

Studienarbeit

Eisenbahnbetriebssimulationen

Ein Vergleich der Tools *OpenTrack* und *RailSys*



Eingereicht beim

Bereich Verkehr
Prof.Dr.-Ing. W.-R. Runge

von

cand. Wirtsch.-Ing.

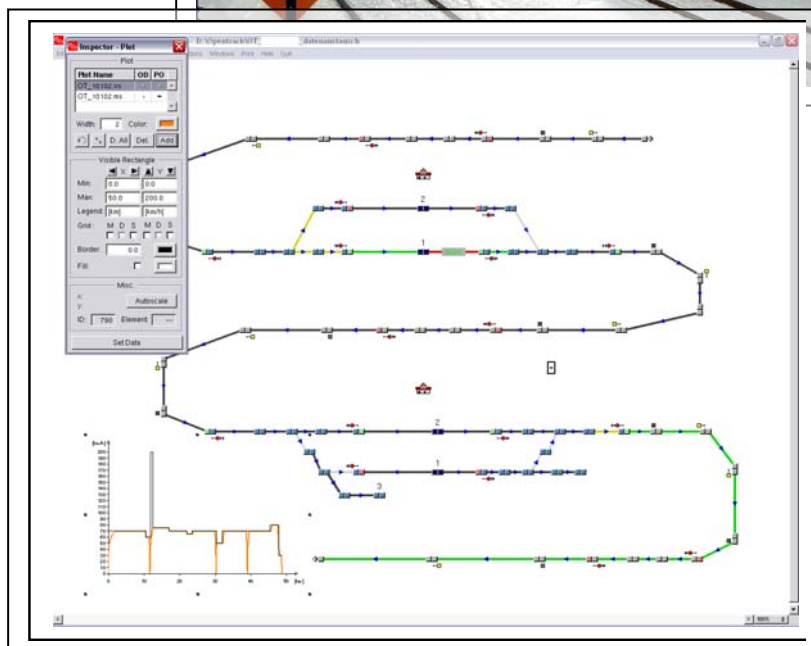
Benedikt Scheier

Matr. -Nr. 40288358

Brahmsstraße 1

38106 Braunschweig

Braunschweig, den xx.xx.2005



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Braunschweig, den yy.yy.2005

Eisenbahnbetriebssimulationen

Ein Vergleich der Tools *OpenTrack* und *RailSys*

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	3
1 EINLEITUNG	5
2 SIMULATION IM EISENBAHNWESEN	7
2.1 ALLGEMEINES	7
2.1.1 Begriffsdefinition	7
2.1.2 Simulationsverfahren	7
2.1.3 Kernpunkte der Simulation	8
2.1.4 Simulationsmodelle	9
2.1.4.1 Mikroskopische Betriebssimulation	10
2.1.4.2 Makroskopische Betriebssimulation	10
2.2 SIMULATIONSTOOLS	11
2.2.1 OpenTrack	12
2.2.2 FBS	14
2.2.3 RailSys	16
2.2.4 Nemo	18
2.2.5 Dynamis	20
3 UNTERSUCHUNG IM VERGLEICH DER FUNKTIONALITÄTEN VON OPENTRACK/RAILSYS	23
3.1 EINLEITUNG	23
3.2 BENUTZEROBERFLÄCHE	23
3.3 GLEISTOPOLOGIE	24
3.4 LEIT- UND SICHERUNGSTECHNIK	24
3.5 FAHRSTRABENEINSTELLUNGEN	26
3.6 ZUGKOMPOSITIONEN	26
3.7 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN DER FAHRDYNAMIK	28
3.8 FAHRPLANGENERIERUNG	29
3.9 DISPOSITIONEN	30
3.10 STÖRUNGEN UND VERSPÄTUNGEN	31
3.11 SIMULATION UND AUSWERTUNG	31
4 VERGLEICH UND BEWERTUNG VON OPENTRACK/RAILSYS	34
4.1 EINLEITUNG	34
4.2 BENUTZEROBERFLÄCHE	34
4.2.1 Einarbeitung, Handbuch und Support	34
4.2.2 Bearbeitung von Projekten	35
4.3 LEIT- UND SICHERUNGSTECHNIK UND FAHRSTRABENEINSTELLUNGEN	40
4.4 ZUGKOMPOSITIONEN	41
4.5 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN DER FAHRDYNAMIK	41
4.6 FAHRPLANGENERIERUNG	42
4.7 DISPOSITIONEN	43
4.8 STÖRUNGEN UND VERSPÄTUNGEN	44
4.9 SIMULATION UND AUSWERTUNG	44
4.10 ÜBERPRÜFUNG DER EINSATZZWECKEIGNUNG	46
4.10.1 Einleitung	46
4.10.2 Berechnung von Fahrzeiten	46
4.10.3 Nachweis von Infrastrukturbedarf und der sicherungstechnischen Ausrüstung	50
4.10.4 Fahrplankonstruktion	51

<i>4.10.5 Stabilitäts- und Machbarkeitsuntersuchungen von Fahrplänen</i>	51
<i>4.10.6 Untersuchungen zum Verhalten des Netzes bei Störungen und Planung von Umbauphasen und Langsamfahrstellen</i>	52
<i>4.10.7 Entwicklung von Dispositionsregeln und –strategien</i>	52
<i>4.10.8 Simulation von Magnetbahnsystemen</i>	52
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	53
6 LITERATURVERZEICHNIS	55
7 ABBILDUNGS-/TABELLENVERZEICHNIS	58

1 Einleitung

Die internationale Verflechtung von Volkswirtschaften, arbeitsteiligen Wirtschaftsformen und die liberalisierten Transportmärkte führen zu einem permanent stark anwachsenden grenzüberschreitenden Transportbedarf im Güterverkehr. Durch die EU – Osterweiterung steht besonders Mitteleuropa und somit vor allem Deutschland vor einer gewaltigen Steigerung des Güterverkehrs der Ost – West Verbindungen „von mehr als 60% bis zum Jahre 2015“ [1]. Bedingt durch das veränderte Mobilitätsverhalten steigt auch die Verkehrsnachfrage im Personentransport. Da das existierende Autobahnnetz als Hauptverkehrsader an seine Leistungsgrenze gestoßen ist und ein unbegrenzter Ausbau der Verkehrsinfrastruktur aus ökologischen und ökonomischen Gründen nicht möglich ist, ist der Kraftfahrzeugverkehr durch den Verkehrsträger „Schiene“ zu entlasten.

Die Stärken der modernen Eisenbahnen eines sicheren, schnellen und zuverlässigen Transportes gebündelter Güter- und Personenverkehrsströme sind zu optimieren und auszubauen.

„Es sind neue Lösungen und Konzepte gefordert, die bei einem umfassenden Einsatz von Leit- und Sicherungstechnik zu einer Erhöhung des Automatisierungsgrades führen und zur Wettbewerbsfähigkeit der Schiene beitragen. Dieser wichtigen Herausforderung in Forschung und Entwicklung stellt sich der Bereich Bahnsysteme des Instituts“ für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung (nachfolgend „IFS“ genannt) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Braunschweig [2].

Um diesen Einsatz von Leit- und Sicherungstechnik unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten realisieren zu können, können mittels EDV Betriebsabläufe und deren dazugehörige Infrastruktur simuliert werden. Auswirkungen von möglichen Eingriffen in die Infrastruktur oder den Betrieb werden in der Simulation erkenntlich. Beispielsweise können so mögliche Überlastungen von Anlagen und Anlagenteile erkannt und vermieden oder Streckenteile auf Kapazitätserhöhung hin untersucht werden ohne kostenaufwendige Strukturveränderungen in der Realität vornehmen zu müssen.

Mit der Nutzung diverser Simulationstools kann der Bereich Bahnsysteme des IFS bei Fragestellungen betreffend der Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Infrastruktur und der Betriebsabläufe Verkehrsunternehmen und Herstellern Antworten geben.

In dieser Arbeit werden verschiedene Typen von Betriebssimulationen erklärt und einige auf dem Markt erhältliche Simulationstools vorgestellt.

Die gängigen Tools *RailSys* (RMCon GmbH) und *OpenTrack* (ETH Zürich) werden untersucht und miteinander verglichen. Das Interesse einer Untersuchung und eines Vergleiches der beiden Simulationstools liegt darin begründet, dass sie laut Herstellerangaben gleichen Einsatzzwecken dienen.

In dieser Arbeit wird anfangs die Bedeutung von Simulationen im Eisenbahnwesen erläutert und auf die Verfahren, den Eisenbahnbetrieb zu modellieren, eingegangen. In Kapitel 3 werden die oben genannten Tools tabellarisch untersucht und gegenübergestellt, um im darauf folgenden Kapitel verglichen zu werden. Dabei werden Unterschiede, die Auswirkungen auf das Bedienungsverhalten und die Einsatzmöglichkeiten der Tools haben, herausgearbeitet und einer vergleichenden Bewertung unterzogen.

2 Simulation im Eisenbahnwesen

2.1 Allgemeines

2.1.1 Begriffsdefinition

Der Begriff Simulation leitet sich vom lateinischen Wort „simulare“ ab, welches übersetzt „nachbilden“, „abbilden“ bedeutet. Damit ist gemeint, dass ein reales System oder ein Prozess mit Hilfe eines Ersatzsystems abgebildet und untersucht wird [3].

Es werden vereinfachte Simulationsmodelle entwickelt – in der Regel Computermodelle – die von ihrer Struktur her mit dem zu untersuchenden realen System übereinstimmen. Entscheidend ist, dass die wesentlichen Komponenten vom Modell und vom realen System die gleiche Funktionalität besitzen [4].

Der Wert derartiger Modelle liegt darin begründet, Informationen über das zu untersuchende System gewinnen zu können, die normalerweise nicht direkt zugänglich sind. Mit dem Realen kann häufig nicht in der gewünschten Weise experimentiert werden [5]. Die Durchführung von Experimenten im realen System ist im Allgemeinen zu teuer oder für Mensch und Umwelt nicht tragbar.

Am Modell können relativ leicht Veränderungen vorgenommen und deren Auswirkungen untersucht werden.

2.1.2 Simulationsverfahren

Eine Methode für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen ist die Simulation des Eisenbahnbetriebs. Besonders für Untersuchungen von komplexen Anlagen ist sie geeignet, wenn die betrieblichen Anforderungen bekannt sind.

Ziel ist, den realen Betriebsablauf mittels EDV abzubilden, um daraus Rückschlüsse auf die Eignung von vorhandenen oder geplanten Anlagen bezüglich der betrieblichen Anforderungen ziehen zu können.

Simulationen werden entweder synchron oder asynchron durchgeführt.

Bei der synchronen Durchführung werden alle Betriebsvorgänge im Zeitschrittverfahren oder ereignisorientiert nachgebildet [6]. So werden das Einspielen von Urverspätungen und die Reaktion des Gesamtsystems darauf ermöglicht. Das Priorisieren von Zügen hat entscheidenden Einfluss auf den Ablauf des Betriebes. Die synchrone Durchführung kann dies simulieren und stellt unter anderem deshalb eine Modellierung des Betriebsablaufes dar.

Die asynchrone Simulation ist ein statisches Abbild der Fahrplankonstruktion oder von Dispositionen in der Betriebsdurchführung. Fahrzeitberechnungen, Anschlussverbindungen, etc. werden durchgeführt ohne den gesamten Betriebsablauf simulieren zu müssen. Diese Berechnungen müssen nicht im Zeitschrittverfahren berechnet werden, da sie unabhängig von ungedeckten Variablen operieren.

Bei neueren Entwicklungen werden beide Varianten der Durchführung kombiniert. Z.B. erhalten synchrone Verfahren für die Disposition asynchrone Teile oder der der Simulation zugrunde liegende Fahrplan wird von einer asynchronen Simulation für die beeinflussbare Zukunft fortgeschrieben.

2.1.3 Kernpunkte der Simulation

Anwendungsgebiete

Simulationen ermöglichen am Modell detaillierte Untersuchungen von Betriebsvorgängen auf komplexen Streckennetzen, Knotenpunkten und einzelne Strecken. Für folgende Zwecke werden Untersuchungen mit Hilfe der Simulation durchgeführt:

- Zur Fahrplankonstruktion
- Ausschöpfung der Kapazitäten
- Zur Überprüfung von Fahrplanstabilitäten
- Modellierung von Störungseinflüssen des Betriebes
- Für fahrdynamische Berechnungen, z.B. Fahrzeitberechnungen
- Zur Nutzenuntersuchung geplanter und bestehender Infrastruktur

Differenzierung: Untersuchungsraum, Betrachtungsraum

Gerade bei Fahrplankonstruktionen und Überprüfungen von Fahrplanstabilitäten reicht es nicht aus den eigentlichen Untersuchungsraum zu betrachten. Vielmehr muss die Lage des Raumes im Netz betrachtet werden, der so genannte Betrachtungsraum. Dieser muss demnach so gewählt werden, dass umliegende Faktoren, die Auswirkungen auf den zu untersuchenden Raum haben, mit in die Untersuchung einbezogen werden.

Dadurch ist gewährleistet, dass die Ergebnisse der Auswertungen in der Realität Anwendung finden können, da die Abhängigkeiten der Knoten untereinander mit abgebildet werden und dies eine Voraussetzung ist, Betriebsvorgänge realitätsnah zu simulieren.

Fahrplankonstruktion/-überprüfung

Jede Änderung des Betriebes, beispielsweise resultierend aus baulichen Maßnahmen an der Infrastruktur, hat Auswirkungen auf den bestehenden Fahrplan.

Mit Hilfe der Simulation können erwartete Störungseinflüsse, z.B. Baustellen, aber auch schwer zu erwartende Störungseinflüsse, wie z.B. Wetter/Witterung modelliert werden, um so Rückschlüsse auf die Fahrplanstabilität ziehen zu können.

Beim Planen neuer Trassen können diese auf Kapazität und Funktionalität hin untersucht werden. Die geplante Infrastruktur wird im Computer aufgebaut und ein konfliktfreier Fahrplan erarbeitet. Dieser kann wiederum gestört werden, um die Stabilität und Qualität des auf vorhandenen oder geplanten Anlagen durchzuführenden Betriebes zu überprüfen.

2.1.4 Simulationsmodelle

In der Simulation gibt es drei Modelle, die sich im Detaillierungsgrad des zu modellierenden Betrachtungsraumes und die Menge, der in die Berechnungen eingehender Daten unterscheiden:

- **Mikroskopische Modelle** basieren auf sekundengenauen Fahrplandaten und metergenauen Angaben zur Infrastruktur. Typisches Merkmal ist die Abbildung von individuellen Zugfahrten, die eine exakte Konflikterkennung ermöglicht, gleichzeitig aber auch einen hohen Rechenaufwand verursacht.
- **Makroskopische Modelle** beinhalten eine vereinfachte Abbildung von Zugfahrten, bei der anstelle der individuellen Betrachtung das mittlere Verhalten von Zuggruppen ohne zugehörigen Fahrplan dargestellt wird. Für diesen Ansatz ist eine weniger detaillierte Auflösung der Infrastruktur ausreichend. Die Ergebnisse erfordern einen geringeren Rechenaufwand, zeichnen sich aber durch einen höheren Grad an Unschärfe aus.
- **Mesoskopische Modelle** liegen in ihrer methodischen Ausrichtung zwischen den anderen beiden Ansätzen und verfolgen das Ziel eines Ausgleichs zwischen hoher Ergebnisschärfe und niedrigem Rechenaufwand.

Quelle: [7]

2.1.4.1 Mikroskopische Betriebssimulation

Da die mikroskopische Betriebssimulation bei der Modellierung von Infrastruktur- und Betriebsdaten auf eine sehr detaillierte Datengrundlage fußt, ist eine der Realität entsprechende Abbildung des Betriebsablaufs möglich. Damit lassen sich konkrete betriebliche oder infrastrukturelle Maßnahmen im Voraus bewerten und Fehler in der Gestaltung der Infrastruktur oder des Fahrplans bereits in der konzeptionellen Phase frühzeitig aufdecken.

Der mikroskopische Netzgraph ist ein attributierter Knoten-Kanten-Graph. Die Knoten bilden ortsfeste Infrastrukturelemente ab, wie z.B. Signale, Haltetafeln, Weichen. Die Kanten zwischen den Knoten werden mit den benötigten Attributen Gleislänge, Gradient und zulässige Geschwindigkeiten belegt. Eine grafische Benutzeroberfläche unterstützt die Eingabe und Bearbeitung der Daten.

Zur Datengewinnung stehen Importfilter für eine große Anzahl verschiedener Datenformate zur Verfügung. Die Datenschnittstelle „RailML“ ist für einen möglichst verlustfreien und kompatiblen Datenaustausch entwickelt worden und schon in vielen Tools implementiert.

Zugdaten und –fahrzeiten

Für jedes Triebfahrzeug wird ein Zugkraft- / Geschwindigkeits- Diagramm (Z/V – Diagramm) angelegt. Länge, Gewicht und Formeln zur Widerstandsberechnung sind sowohl bei den Triebfahrzeugen als auch bei den Wagenzügen anzugeben.

Die Attribute der Kanten (Gradienten, zul. Geschwindigkeiten, etc.), die Leit- und Sicherungstechnik, das Z/V – Diagramm, sowie die Widerstandsberechnungen gehen in die Berechnung ein und führen zur einer exakten Fahrzeit (Mindestfahrzeit). Die Regelfahrzeit ist die Mindestfahrzeit zusätzlich zur benutzerdefinierten Pufferzeit, die als Sicherheitsreserve im Störfall dient.

2.1.4.2 Makroskopische Betriebssimulation

Die Dimensionierung der Infrastruktur spielt eine entscheidende wirtschaftliche Rolle: Bei zu großer Dimensionierung entstehen freie Kapazitäten, die möglicherweise zu einem unrentablen Betrieb führen. Wird die Infrastruktur jedoch unzureichend in ihrer Kapazität geplant, sind Engpässe und somit Stauerscheinungen zu erwarten. Dies führt zu Zeitverlusten und/oder teurer, aufwendiger und zusätzlicher Disposition und letztendlich wiederum zu einem unrentablen Betrieb.

Die makroskopische Betrachtung bildet das komplexe Zusammenwirken von Verkehrsnachfrage, Produktionsstrukturen und Netzinfrastruktur auf einer Ebene ab.

So werden nachfragegerechte Zugzahlen ermittelt, optimale Laufwege gesucht und die resultierende Netzauslastung dargestellt, um Kapazitätsengpässe sowie ungenutzte Kapazitäten zu erkennen [7].

Dies ist für eine Untersuchung der effizienten Investitionsmittelnutzung unerlässlich. Jedoch sollte eine konkrete Entscheidung durch begleitende Untersuchungen auf der mikroskopischen Seite ergänzt werden.

Analog zu dem mikroskopischen Netzgraph wird der Netzgraph der makroskopischen Betrachtung mit Knoten und Kanten dargestellt, mit dem Unterschied, dass die Knoten Betriebsstellen und die Kanten Gleisverbindungen ohne genaue Attributierung repräsentieren.

Zugdaten und -fahrzeiten

Die Modellzüge werden in Personen-, Güter-, Nah- und Fernverkehr kategorisiert. Um sie im Netzgraph abbilden zu können, wird ihnen eine richtungsabhängige Fahrzeit und individuell eine Kante zugewiesen (\approx Laufwege). Aus der Gesamtheit der Laufwege kann eine Netzbelastung abgeleitet werden.

Aus der Kombination der Mindestzugfolgezeiten, die von der jeweiligen Zugpaarung abhängen, werden mit den Zugzahlen Belegungsgrade und mittlere Pufferzeiten je Kante ermittelt, die als Kriterien für die Bewertung der Netzauslastung dienen.

2.2 Simulationstools

Die im weiteren Verlauf vorgestellten Simulationstools sind von Universitäten, Consulting – Unternehmen oder in Zusammenarbeit beider entwickelt worden und werden in diesem Kapitel in kurzer Form vorgestellt.

Jede Betriebssimulation im Eisenbahnwesen arbeitet prinzipiell nach folgendem Schema, zu sehen in Abbildung 1. Unterschiede gibt es im Detaillierungsgrad der Input-Daten, abhängig von einer mikroskopischen oder makroskopischen Arbeitsweise und in den zur Verfügung stehenden Daten zur Auswertung, abhängig von der Hauptzielstellung des Programms. Ein Simulationstool z.B., welches hauptsächlich Fahrzeitberechnungen unternimmt, wird keine Gleisbelegungsschaubilder zur Auswertung bieten.

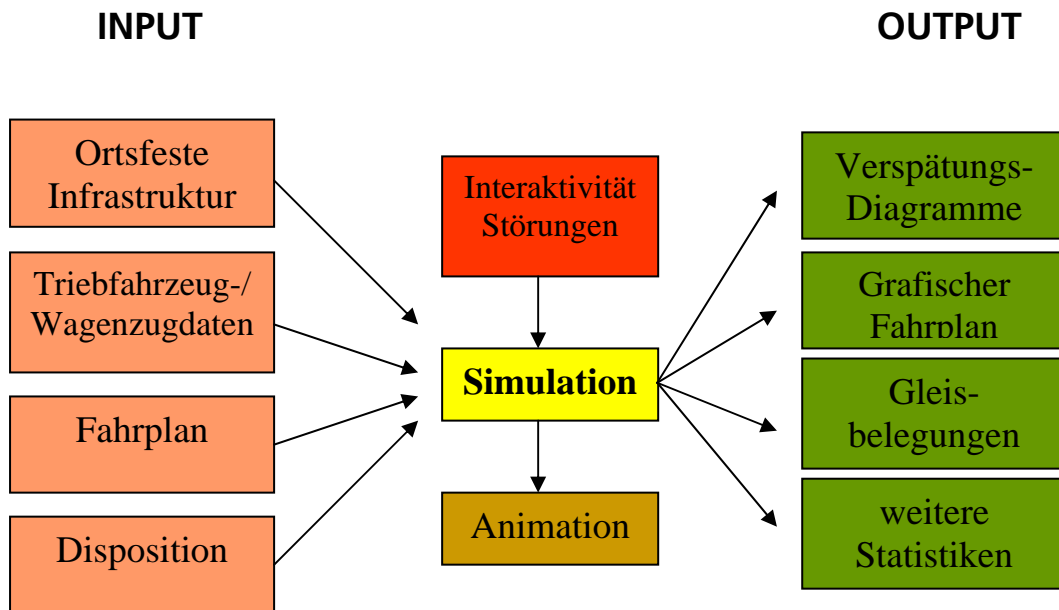


Abbildung 1: Input/Output – Schema von Betriebssimulationen im Eisenbahnwesen

2.2.1 OpenTrack

OpenTrack – Simulation von Eisenbahnnetzen ist über das Forschungsprojekt *Objektorientierte Modellierung im Eisenbahnwesen* des Instituts für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau (IVT) der ETH Zürich entstanden. Ziel war es, eine benutzerfreundliche, auf verschiedenen Rechnerplattformen lauffähige Applikation zu entwickeln, die durch Simulation verschiedenste Fragen des Eisenbahnbetriebes beantworten kann [8].

Basierend auf den objektorientierten Technologien OMT^I und UML^{II} [9] wird ein mikroskopisches Modell des Eisenbahnbetriebes aufgestellt [9]. Das Schema des Modells ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Simulation wird synchron durchgeführt.

Die Gleisanlagen werden in Form von Doppelpunktgraphen diskretisiert und danach mittels UML beschrieben [9]. Letztendlich lassen sich durch eine grafische Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 2) die Eisenbahnnetze, Fahrzeuge und Fahrpläne entwerfen und verwalten.

^I Object Modeling Technique

^{II} Unified Modeling Language

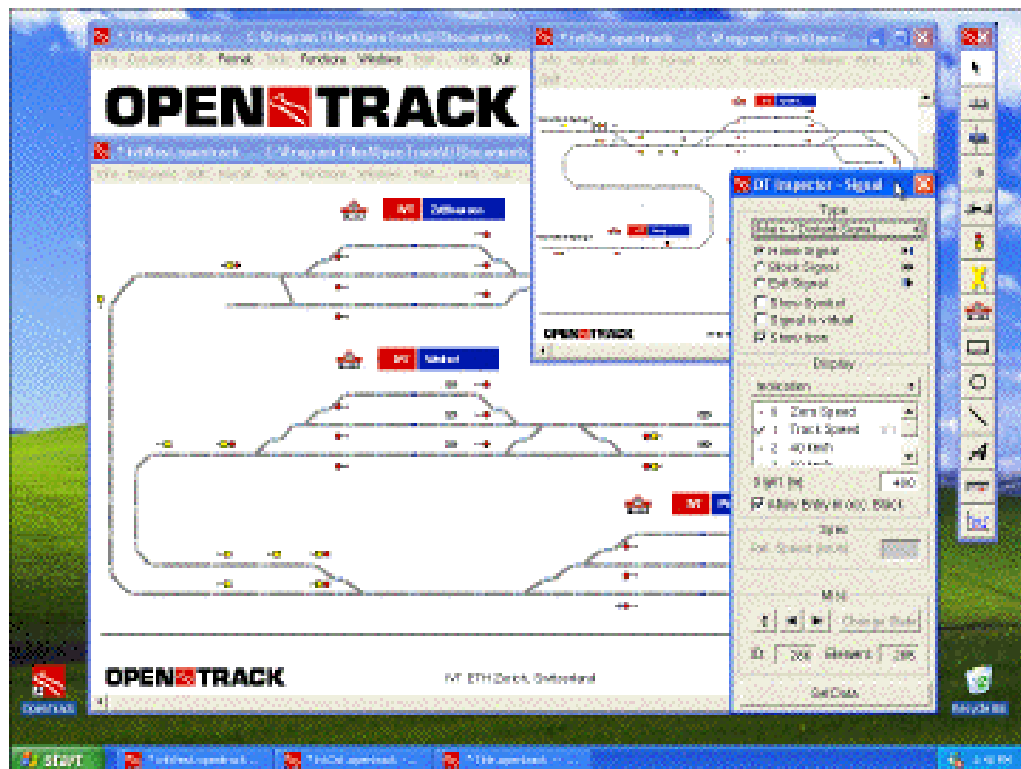


Abbildung 2: grafische Benutzeroberfläche OpenTracks unter Windows XP

Einsatzgebiete:

- Berechnung von Fahrzeiten
- Fahrplankonstruktion
- Stabilitäts- und Machbarkeitsuntersuchungen von Fahrplänen
- Nachweis von Infrastrukturbedarf
- Planung von Umbauphasen und Langsamfahrstellen
- Verhaltensanalyse existierender bzw. zukünftiger Triebfahrzeuge
- Untersuchungen zum Einsatz der Eisenbahnsicherungstechnik (z.B. konventionelles Blocksystem, Kurzblocksystem, LZB, ETCS Level 1, ETCS Level 2, ETCS Level 3 [Moving Block], ERTMS)
- Untersuchungen zum Verhalten des Netzes bei Störungen
- Simulation von Magnetbahnsystemen (Transrapid, Maglev)

Referenzen:

- Deutsche Bahn AG
- Schweizerische Bundesbahnen (SBB)
- TransAdelaide, Australien
- Siemens Schweiz AG, Verkehrstechnik
- Bombardier Transportation, Schweiz
- Siemens AG, Verkehrstechnik, Deutschland
- Transrapid International, Deutschland
- MVP Versuchs- und Planungsgesellschaft für Magnetbahnsysteme, München
- Technische Universitäten der Städte Wien, Berlin, Prag und Braunschweig
- Etc.

Quelle: [8]

2.2.2 FBS

Das *Fahrplanbearbeitungssystem FBS* wird seit 1993 im von der TU Dresden ausgegliederten privatrechtlichen Institut für Regional- und Fernverkehrsplanung (iRFP) weiterentwickelt.

Das asynchron arbeitende *FBS* ist ausschließlich für die Fahrplanerstellung und –bearbeitung entwickelt worden und besteht zurzeit aus folgenden Programmen:

- Das **(Bild-)Fahrplanprogramm FPL 4.4** berechnet Fahrzeiten und stellt die Zugverläufe grafisch in einem Weg / Zeit-Diagramm dar (siehe Abbildung 3). Dazu benötigt es Daten über Höhenangaben, Lage und Art der Betriebsstellen und Geschwindigkeiten, Anzahl und Nutzungsregeln der Bahnhofs- und Streckengleise. Die ebenfalls benötigten Triebfahrzeugdaten sind im Programmpaket enthalten. [10]
- Das **Bahnhofsfahrordnungsprogramm BFO 2.4** ist für die Einteilung der Gleisbesetzung größerer Bahnhöfe prädestiniert. Benötigte Zugdaten werden aus dem FPL-Bildfahrplanprogramm importiert. BFO weist Zügen selbstständig Gleise entsprechend eines definierbaren Taktbahnsteiges zu. Es wird mit grafischen Gleisbelegungsplänen gearbeitet. [11]
- Das **Netzprogramm NETZ 1.3** verknüpft mehrere mit FPL konstruierte Streckendateien zu dem im täglichen Betrieb befahrenen Betriebsnetz. Bereits vorhandene Zugdaten werden aus FPL und BFO importiert. Nach der Verarbeitung in den Modulen Buchfahrplan, Tabellenfahrplan und Umlaufplan stehen

- Zusatzprogramm zum Bearbeiten des Bahnhofsverzeichnisses.
- Zusatzprogramm zum Hinzufügen, Bearbeiten und Ausdrucken von Triebfahrzeugdaten.
- FBS-Dateiverwaltungsprogramm

Quelle: [13]



15

Referenzen:

- Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH
- Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen mbH
- SNCF International S.A., Paris
- Technische Universitäten der Städte Berlin, Dresden und Braunschweig
- Griechische Staatsbahn (OSE)
- Lettische Staatsbahnen (LDZ)
- Dehli Metro Rail Corporation, Neu Dehli
- Etc.

Quelle: [14]

2.2.3 RailSys

Im März 1999 wurde das Schienenverkehrsmanagement- und Softwareentwicklungsunternehmen Rail Management Consultants GmbH (RMCon) gegründet, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb (IVE) der Universität Hannover die Simulationssoftware *RailSys* vertreibt.

RailSys „ist ein Programmsystem zur Analyse, Planung und Optimierung von Betriebsabläufen und –Anlagen in beliebig großen Netzen spurgeführter Verkehrssysteme“ [15] und ähnelt vom Schema (siehe Abbildung 1 auf Seite 8) und von den Einsatzgebieten her stark dem Simulationstool *OpenTrack*. Es ist ebenfalls ein mikroskopisches Modell mit grundsätzlich synchroner Durchführung.

RailSys ist in drei Teilprogrammen untergliedert: den Infrastrukturmanager, den Fahrplan- und Simulationsmanager und den Auswertungsmanager. Die Arbeitsoberfläche im Fahrplan- und Simulationsmanager mit der Fahrplantabelle, dem Knoten-Kanten-Graph, dem Geschwindigkeitsband der Strecke und dem Bildfahrplan sind in Abbildung 4 zu sehen.

Zurzeit laufen mit *RailSys* in Europa, Kleinasien und Australien insgesamt rund 85 Projekte.

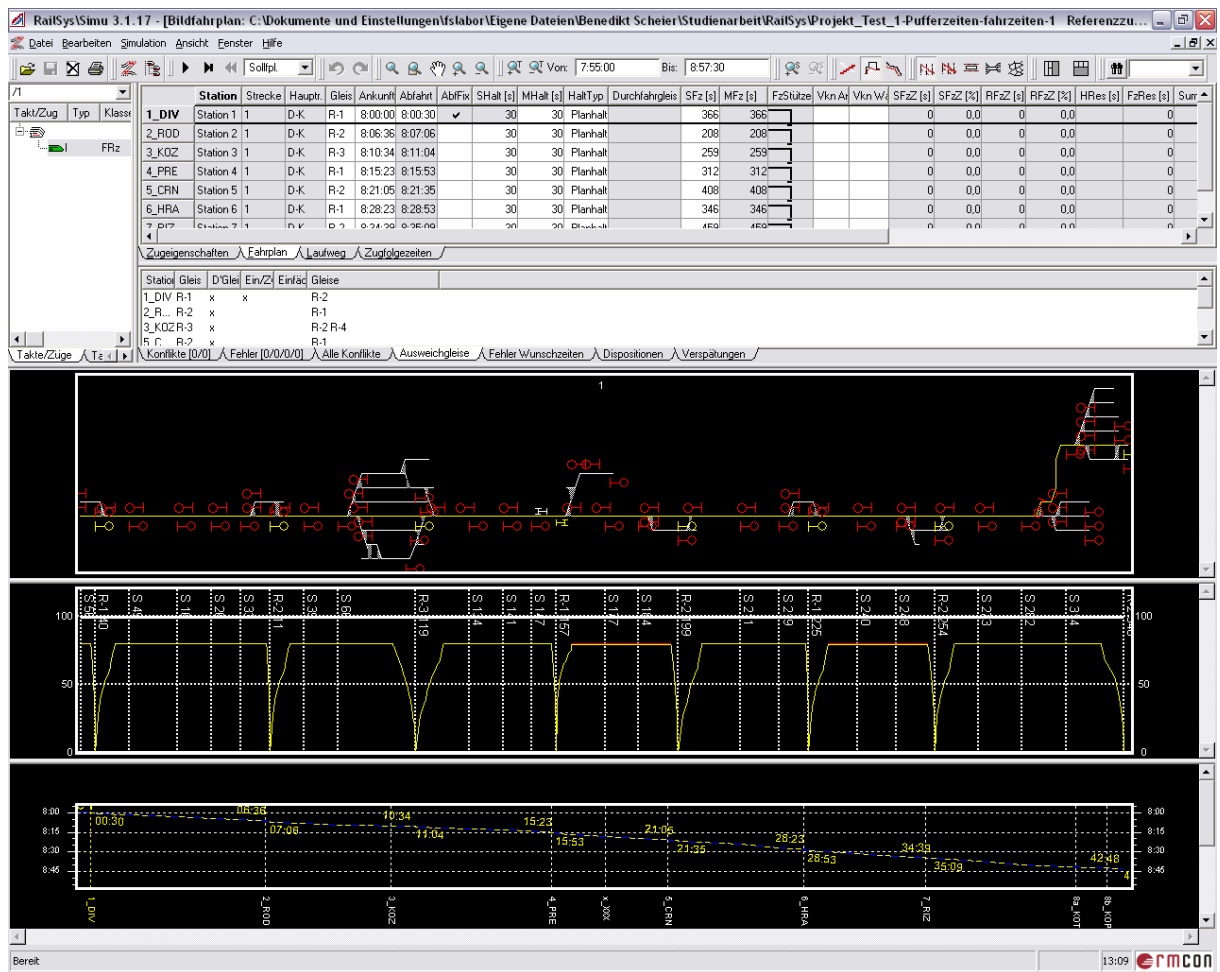


Abbildung 4: Arbeitsoberfläche von RailSys

Einsatzgebiete:

- Fahrplankonstruktion und -planung für neue oder bestehende Strecken, Knoten und Netze
- Ermittlung und Beurteilung des Infrastrukturbedarfs und der sicherungstechnischen Ausrüstung
- Entwicklung von Dispositionsregeln und -strategien
- Simulation ungestörter und gestörter Betriebsabläufe zur Bewertung der Fahrplanstabilität/-qualität
- Erarbeitung kompletter Betriebsprogramme unter Berücksichtigung von Randbedingungen
- Fahrzeugumlaufplanung zur Bemessung des Fahrzeugparks

Referenzen:

- Eisenbahn-Bundesamt (EBA)
- Deutsche Bahn AG
- State Rail Authority, Australien
- WS Atkins Rail Limited, Großbritannien und Dänemark
- TUC Rail, Belgien
- 15 Universitäten aus ganz Europa
- Rotem Company, Republik Südkorea
- Etc.

Quelle: [16]

2.2.4 Nemo

Nemo ist ein am IVE der Universität Hannover entstandenes „Netz Evaluations Modell“ mit makroskopischer Betrachtung. Detaillierte fahrdynamische und sicherungstechnische Eigenschaften von Strecken können aus einer mikroskopischen Darstellung übernommen werden (Vorzugsweise aus *RailSys*). Somit lassen sich die Vorteile eines mikroskopischen und eines makroskopischen Modells miteinander verbinden.

Mit Nemo werden sowohl integrierte Betrachtungen von Netzinfrastruktur, Betrieb und Verkehrsnachfrage, als auch ökonomische Bewertungen von Betriebsvarianten und effiziente Dimensionierungen von Schieneninfrastruktur durchgeführt (siehe Abbildung 5). [17]

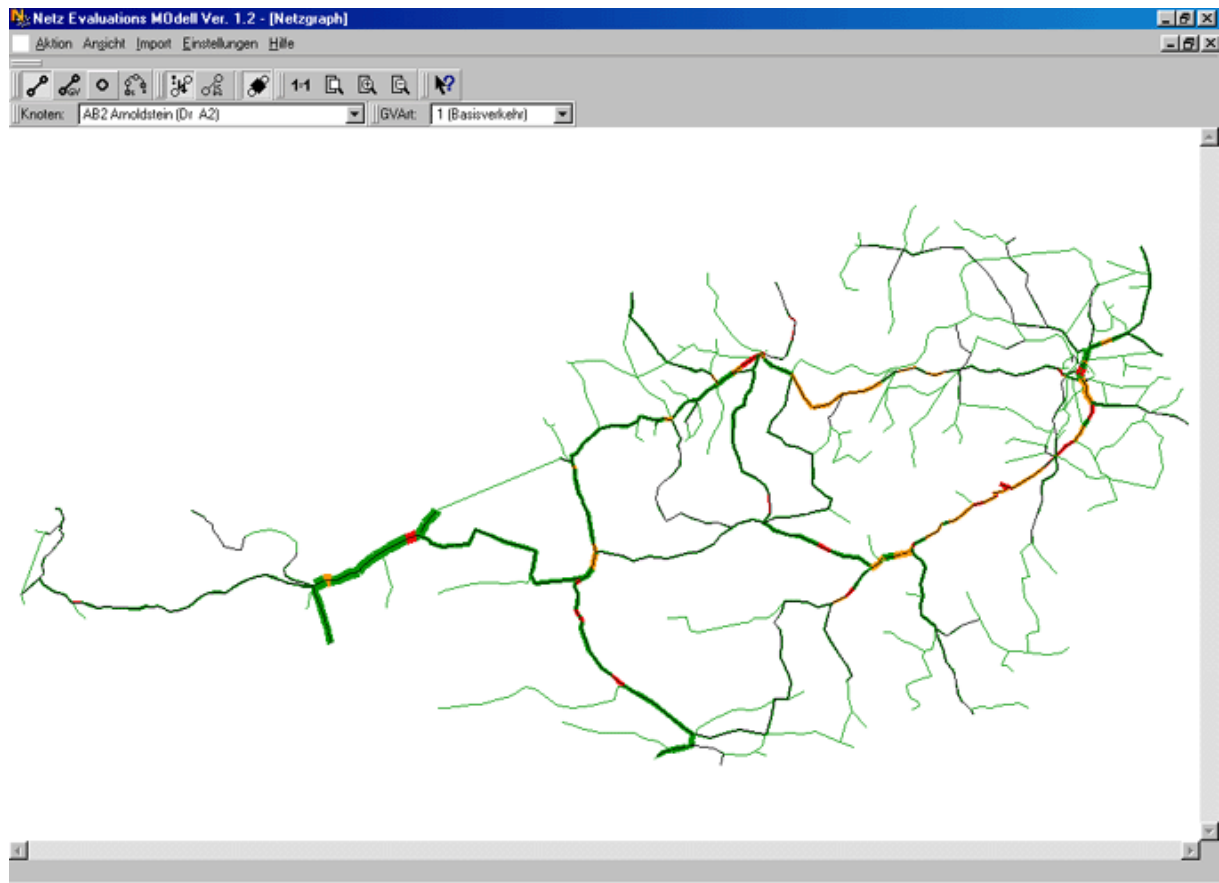


Abbildung 5: Nemo - Netzbelastung und Engpassermittlung

Einsatzgebiete:

- Infrastrukturplanung in Schienenverkehrsnetzen
- Erkennung und Auflösung von Kapazitätsengpässen
- Evaluation von Verkehrsangebot und –nachfrage
- Optimierung von Produktionsstrukturen im Güterverkehr
- Gesamtwirtschaftliche Bewertung von Planungsszenarien

Quelle: [17]

Referenzen:

- Österreichische Bundesbahnen (ÖBB); Geschäftsbereich Netz
- Österreichische Bundesbahnen (ÖBB); Geschäftsbereich Güterverkehr
- Projekt CargoRail: Strategien zur Verlagerung von Güterfernverkehr von der Straße auf die Schiene; BMBF

Quelle: [17]

2.2.5 Dynamis

Seit Mitte der achtziger Jahre wird am IVE der Universität Hannover das Fahrdynamikprogramm Dynamis entwickelt, welches hochgenaue Fahrzeitrechnungen beliebiger Zugverbände auf beliebigen Eisenbahnstrecken erlaubt, da physikalische Grundlagen der Zugfahrt sowie die technischen Randbedingungen detailliert modelliert werden. Basisdaten für weiterführende Planungen wie z.B. Fahrplankonstruktion, Bemessung von Sicherungsanlagen, Berechnung von Energieverbrauch oder Konzeption neuer Zugtechnologien werden geliefert.

Neben der Ermittlung kürzester Fahrtzeiten lassen sich mit Dynamis auch andere Fahrstrategien, wie z.B. „energiesparende Fahrweise und Bestimmung von Grenzlaster abbilden“. [18]

Die mikroskopische Modellierung von Dynamis führt zu einem veränderten Schema als in Abbildung 1, zu sehen in Abbildung 2. Dabei werden im Output die Kenngrößen Zugkraft, Bremskraft, Geschwindigkeit, Energiebedarf und Leistung über den Streckenverlauf betrachtet.

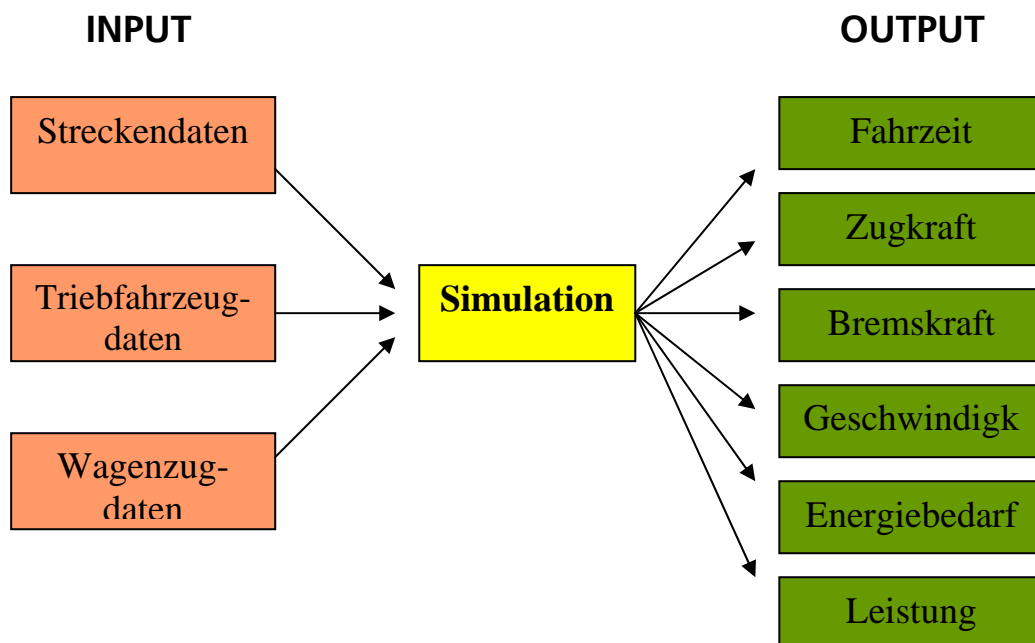


Abbildung 6: Input/Output – Schema von Dynamis

Einsatzgebiete:

- Bestimmung fahrdynamischer Kenngrößen
- Analyse von Fahrtverläufen
- Zug- und Triebfahrzeugdimensionierung
- Abbildung neuer Bremstechnologien
- Abbildung unterschiedlicher Fahrstrategien

Quelle: [18]

Referenzen:

- Deutsche Bahn AG, DB Systemtechnik
- Österreichische Bundesbahnen (ÖBB); Geschäftsbereich Netz
- Hamburger Hochbahn AG (HHA)
- Rail Infrastructure Cooperation (RIC), Australien
- TucRail, Belgien
- Universitäten und Forschungseinrichtungen
- Intraplan Consult GmbH, München
- Etc.

Quelle: [18]

2.2.6 SIMU VII – Simulation von Eisenbahnbetriebsabläufen

Das Programmsystem *SIMU VII* ist ein Instrument zur Untersuchung bahnbetrieblicher Fragestellungen. „Unterschiedliche Signalssysteme, Fahrstrategien und spezielle Abhängigkeiten zwischen den Zugfahrten werden gleichermaßen realitätsnah abgebildet. Durch den modularen Aufbau können sowohl lokal begrenzte Untersuchungen (z.B. von einzelnen Bahnhöfen) durchgeführt als auch lange Strecken und komplexe Netzbereiche dargestellt werden.“ [19]

Das Ingenieurbüro für Bahnbetriebssysteme (IBS) GmbH in Hannover entwickelt dieses Simulationssystem ständig weiter und wendet es innerhalb eines Spektrums von kurz- bis langfristigen Planungsaufgaben an:

- Einsatz als **Informationssystem**: „Das System liefert eine detailgenaue Darstellung des Streckennetzes unter Angabe von Signalstandorten, Geschwindigkeiten, Durchrutschwegen“, etc. (siehe Abbildung 7).

- Einsatz zur **Fahrplankonstruktion und –verifikation**: „Die Erstellung eines Fahrplans geschieht mit Hilfe eines interaktiven Fahrplankonstruktionsmoduls. Dieses Programm enthält neben der netzweiten Betrachtung von Fahrplänen eine automatische Fahrzeitrechnung“ und Konflikterkennung. „Zur Stabilitätsuntersuchung von Fahrplänen wird der Sollbetriebsablauf mit realistischen Abweichungen (Einbruchverspätungen, Haltezeitverlängerungen, Baustellen, usw.) überlagert, die Verspätungen werden protokolliert und mit Hilfe statistischer Methoden ausgewertet.“
- Einsatz zur **Anlagenbemessung**: „Neben Verspätungsauswertungen und Leistungsdarstellungen können auch Kostenfunktionen eingesetzt werden, um eine monetäre Bewertung durchzuführen.“
- Einsatz zur **Betriebsvisualisierung**: „Darstellung verschiedener Betriebsszenarien mit interaktiven Eingriffen in den laufenden Betrieb. Bei Bedarf können Simulationen unterbrochen und weitere Eingaben (z.B. Umleiten von Zügen) vorgenommen werden. Der Vergleich des Soll- und Ist-Betriebsablaufs wird u.a. mit Hilfe von Online-Bildfahrplänen durchgeführt.“

[Quelle: 20]

Referenzen:

- Deutsche Bahn (DB AG)
- Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB)
- Nahverkehrsbahnen
- Öffentliche Auftraggeber
- Gebietskörperschaften
- Etc.

[Quelle: 19]

3 Untersuchung im Vergleich der Funktionalitäten von OpenTrack/RailSys

3.1 Einleitung

In Kapitel 2 geht hervor, dass die mikroskopisch arbeitenden Simulationstools *OpenTrack* und *RailSys* ähnlichen Einsatzgebieten angedacht sind. Um Unterschiede der Tools herausarbeiten zu können, werden in diesem Kapitel quantitativ und vergleichend die Funktionalitäten der Tools und die Möglichkeiten der Eingabeparameter für die Modellierung untersucht.

Da beide Tools unter ständiger Weiterentwicklung stehen, insbesondere *OpenTrack*, welches praktisch monatlich einem Update unterliegt, sind dies die Versionen mit denen noch wenige Wochen vor Schluss der Arbeit gearbeitet wurde:

- *RailSys*: Version 3.1.17
- *OpenTrack*: Version 1.3.16

Die Darstellung der quantitativen Untersuchung erfolgt in Form von vergleichenden Tabellen, in denen alphabetisch vorgegangen wird, damit eine, für den Leser besonders wichtige Funktion, zügig gefunden werden kann.

Folgende Zeichen werden benutzt:

- ☑: Die Möglichkeit der Eingabe dieses Datentyps / Nutzung der Funktion besteht.
- ☒: Die Möglichkeit der Eingabe dieses Datentyps / Nutzung der Funktion besteht nicht.
- ☒^x: ergänzende Bemerkungen werden Unterkapitelweise eingesetzt

3.2 Benutzeroberfläche

Benutzeroberfläche	OpenTrack	RailSys
Makroskopische Darstellung (Netzansicht)	☒	☑
Mikroskopische Darstellung (Streckenansicht)	☑	☑
Rückgängig bzw. Wiederherstellen Button	☒	☑
Zoomfunktion	☑	☑
Mehrere Arbeitsplätze arbeiten an einem Projekt ¹	☑	☑

Tabelle 1: Die Benutzeroberfläche

¹ siehe Kapitel 4.2.2 für weitere Informationen

3.3 Gleistopologie

Gleistopologie	OpenTrack	RailSys
Ausrüstung mit Zahnstangen für Zahnradbahn	✓	✗
Elektrifizierung	✓ ¹	✓ ¹
Kilometrierung	✓	✓
Kreuzung	✓	✓
Länge [m]	✓	✓
Max. Radsatzlast [t]	✗	✓
Neigung / Gradient [%]	✓	✓
Radius [m]	✓	✓
Tunnelquerschnitt [m²]	✗ ²	✓
Überhöhung [mm]	✗	✓
Vmax [km/h] bezogen auf Zugkategorien	✓	✓
Vmax [km/h] Streckenbezogen	✗	✓
Weiche	✓	✓

Tabelle 2: Daten zu der Gleistopologie

¹ Während bei *RailSys* die Angabe gemacht wird, ob dieser Streckenabschnitt elektrifiziert ist oder nicht, können bei *OpenTrack* einer Strecke ein bestimmtes Stromsystem zugewiesen werden. Es stehen fünf Wechselstromsysteme und acht Gleichstromsysteme zur Auswahl.

² Tunnel werden bei *OpenTrack* nicht mit einem Querschnitt in m² definiert. Es wird eine Auswahl getroffen, ob der Tunnel ein- oder zweispurig ist und ob er raue oder glatte Wände hat. Des Weiteren kann dem Tunnel ein Faktor zur Berechnung der Widerstände zugewiesen werden. Für Güterzüge wird der doppelte Wert des Faktors verwendet.

3.4 Leit- und Sicherungstechnik

In der folgenden Tabelle werden Installationen der Leit- und Sicherungstechnik aufgeführt, die in den Tools direkt zur Auswahl stehen. Es ist durchaus möglich über „Umwege“ die Funktion z.B. eines Signalsystems zu modellieren. Wenn dies bei bestimmten Systemen der Fall ist, wird in den Fußnoten und/oder Kapitel 4 näher darauf eingegangen.

Signale	OpenTrack	RailSys
CAB Start-/Endsignal / LZB – Tafel	✓	✓
Haltepunkte	✓	✓
Hauptsignal	✓	✓
Hauptsignal 2-Aspekt	✓	✗
Kombiniertes Signal	✓	✓
Kombiniertes Signal 3-Aspekt / - 4-Aspekt	✓	✗
Signal für Sollgeschwindigkeit des Zuges - Start-/Endsignal	✓ ¹	✗
Power off / on Signal	✓ ²	✗
Performance Signal	✓ ³	✗
Rangiersignal	✓	✓
Vorsignal	✓	✓
Vorsignal 2-Aspekt	✓	✗
Vorsignal der Langsamfahrstelle	✓	✗
Streckenausstattungen	OpenTrack	RailSys
Auflösekontakt	✓	✓
Darstellung von Bahnübergängen	✓	✗
Darstellung von Stellwerken, Stationen, Depots	✓ ⁴	✗ ⁴
Eurobalise (ETCS)	✓	✓
ETCS Level 1	✓	✓
ETCS Level 2	✓ ⁵	✗
ETCS Level 3 / Moving Block	✓ ✗ ⁶	✓
LZB	✓	✓
PZB / Indusi	✗	✓

Tabelle 3: Die Infrastruktur der Leit- und Sicherungstechnik

¹ Die Sollgeschwindigkeit des Zuges kann über diese Signale gesteuert werden. Beide Signale wirken auf die Position der Zugspitze.

² Diese Signale schalten den Antrieb des Triebfahrzeuges aus bzw. wieder ein.

³ Das Beschleunigungsverhalten und die zukünftige Höchstgeschwindigkeit werden abhängig vom Attribut *Performance [%]* des Signals ausgenutzt.

⁴ Es ist möglich Stellwerke, ähnlich der Stationen, konkret (als mechanisches, elektromechanisches, elektrisches oder elektronisches Stellwerk) zu modellieren. Dies ist in *RailSys* nicht möglich, jedoch lässt sich die Funktion (Auflösegruppierungen und –Zeiten von Fahrstraßen) eines Stellwerkes durchaus modellieren. Die Modellierung eines (Triebfahrzeug-) Depots ist *OpenTrack* vorbehalten.

⁵ Die Periodendauer der Kommunikation zwischen RBC (RadioBlockCentre) und Fahrzeug muss eingestellt werden.

⁶ Die Modellierung eines Moving Block-Systems ist noch nicht möglich. Laut Handbuch sind die Funktionstests noch nicht vollumfänglich abgeschlossen. [21]

3.5 Fahrstraßeneinstellungen

Fahrstraßen	OpenTrack	RailSys
Auflösezeit [s]	✓ ¹	✓
Auflösekontakt; Distanz zum Blockende [m]	✓	✓
Befreiungsgeschwindigkeit [km/h] für Balisen (ETCS)	✓	✗
Bildezeit [s]	✓ ¹	✓
Distanz, aus welcher das Signal von Triebfahrzeug aus erkannt wird	✓	✗
Durchrutschwege [m]	✓	✓
Langsamfahrstellen	✓	✓
Rangierfahrstraßen mit Rangiergeschwindigkeiten	✓	✗
Teilauflösung	✓	✓
Weichengrundstellung kann bestimmt werden	✓	✗
Weichenumlaufzeiten [s]	✓ ¹	✓ ✗ ²

Tabelle 4: Blockeinstellungen

¹ Es kann festgelegt werden, ob Weichenumlaufzeiten und Fahrstraßenreservierungszeiten während der Simulation verwendet werden sollen.

² Ausschließlich im „Moving-Block“ – System werden die Weichenumlaufzeiten modelliert.

3.6 Zugkompositionen

Triebfahrzeugdaten	OpenTrack	RailSys
Adhäsionsverhalten [%]	✓ ¹	✗
Ausrüstung mit Zahnrad	✓	✗
Auswahl des Antriebssystems	✓ ²	✗
B/V – Diagramm	✓	✓
Haftreibungswert [%]	✗	✓ ³
Länge [m]	✓	✓
Laufwiderstand des Triebfahrzeuges	✓ ⁴	✓ ⁵

Masse [t]	✓	✓
Reibmasse [t]	✓	✓ ³
Tfz. hat Empfänger für Balisentelegramme	✓	✗
Tfz. hat Empfänger für Linienleitertelegramme	✓	✗
Tfz. kann Fahrbefehle via Funk entgegennehmen	✓	✗
Verlustleistung [KW]	✓	✗
Zuschlag rotierender Massen	✓	✓
Z/V – Diagramm	✓	✓

Tabelle 5: Daten zu der Triebfahrzeugerstellung

¹ Für jede Lok können die drei Szenarien „gute“, „normale“ und „schlechte“ Adhäsion (z.B. Witterungsbedingt) in Prozent [%] beschrieben werden. Der Prozentwert bezieht sich auf die Reibungsverhalten-Formel von Curtius und Kniffler. Bei der Simulation entscheidet der Bearbeiter welches Szenario in die Berechnung mit eingeht.

² Zur Auswahl stehen *Universal Electric*, *Thermic*, *Thermoelectric*, 5 AC, 8 DC und *Maglev*.

³ Bei *RailSys* werden diese Daten ausschließlich bei einer verknüpfenden Benutzung mit dem Fahrdynamikprogramm *Dynamis* benötigt.

⁴ Widerstandsfaktor für Zuglaufrechnung (Formel von Strahl; Vorgabewert 3,299)

⁵ Laufwiderstands – Diagramm [KN/km/h]; Berechnungsart:

- Mit konstanten, linearen und quadratischen Koeffizienten über die Formel [V²] oder $[V + V_{\text{wind}}^2]$
- Schrittweise Eingabe über Tabelle [N/km/h]

Wagenzugdaten	OpenTrack	RailSys
Anzahl der Wagen (Einheiten)	✓ ¹	✗
Anzahl Stehplätze	✗	✓
Anzahl Sitzplätze	✗	✓
Gesamtgewicht [t]	✓	✗
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	✓	✗
Lademasse [t]	✗	✓
Länge [m]	✓	✓
Laufwiderstandsbeiwert [%]	✗	✓
Leermasse [t]	✗	✓
Leistungsverlust [KW]	✓ ²	✗
Luftwiderstandsbeiwert [%]	✗	✓

Massenfaktor für Zuschlag rotierender Massen	☑	☒
--	---	---

Tabelle 6: Daten zu der Wagenzugerstellung

¹ Hat ausschließlich Einfluss auf den Widerstand für Magnetbahnen

² Leistungsverluste durch z.B. Klimaanlage, Heizung etc.

3.7 Berechnungsgrundlagen der Fahrdynamik

Sowohl die eingegebenen Triebfahrzeug- und Wagenzugdaten als auch die Daten zur Gleistopologie bieten die Grundlage zur Berechnung der Fahrdynamik. Dieses Unterkapitel zeigt die weiteren Daten auf, die für die Berechnung der Fahrdynamik benötigt werden bzw. „auf Wunsch“ von den Tools zusätzlich mit einbezogen werden.

Außerdem stellen *OpenTrack* und *RailSys* unterschiedliche Formeln zur Berechnung der Widerstände zur Verfügung. Diese werden hier ebenfalls aufgezeigt.

Eingabedaten	OpenTrack	RailSys
Korrektur des Bremsverzögerungswertes in Steigungen [m/s²/‰]	☑	☒
Maximaler Beschleunigungswert [m/s²]	☑	☑
Maximaler Verzögerungswert [m/s²]	☑	☑
Minimaler Verzögerungswert [m/s²]	☑	☒
Regelbremsverzögerung [m/s²]	☒	☑
Wertetabelle der Bremsverzögerung pro Geschwindigkeitsbereich [m/s²]	☑	☒
Wiederbeschleunigungsverzögerung nach Bremsvorgang [s]	☑	☒
Zugkraftbeschränkung [KN]	☑	☑

Tabelle 7: Eingabedaten zu der Berechnung der Fahrdynamik

Widerstände	OpenTrack	RailSys
Bogenwiderstand	☑ nach Formel von Röckl	☑ nach Formeln von: <ul style="list-style-type: none"> • Röckl • Parodi • Protopap • SNCF
Zugwiderstand (Laufwiderstand)	☑ nach Formeln: <ul style="list-style-type: none"> • Strahl/Sauthoff • Davis ($F = m \cdot g / 1000 \cdot (A + B \cdot v^2)$) • Davis ($F = A + B \cdot v + C \cdot v^2$) 	☑ nach Formeln von: <ul style="list-style-type: none"> • Sauthoff • Strahl • Voss • HLB Trieb • ICE Trieb

		<ul style="list-style-type: none"> • ICE 3 / ICE 4
Laufwiderstand- berechnungen für MAGLEV TR / Transrapid	✓	✗

Tabelle 8: Formelauswahl für die Widerstandsberechnung

3.8 Fahrplangenerierung

Fahrplaneintragungen	OpenTrack	RailSys
Anschlussverbindungen (Verknüpfen von Zügen)	✓	✓
Einbau von Fahrzeitreserven für den Verspätungsfall	✓ ¹	✓ ¹
Festlegen der Gültigkeit der Fahrpläne	✗	✓
Minimal Haltezeit [s]	✗	✓ ²
Soll-Haltezeit [s]	✓	✓ ²
Taktkurse	✓	✓
Trennen / Vereinen von Zügen	✓	✗
Wunschankunfts- und Abfahrtszeit	✓	✓

Tabelle 9: Fahrplaneintragungen

¹ Bei *OpenTrack* wird die Maximalgeschwindigkeit bei einer Verspätung gefahren. Bei *RailSys* ist dies auch der Fall, jedoch kann zusätzlich ein Verspätungsschwellwert gesetzt werden, ab wann der Zug auf maximale Geschwindigkeit beschleunigt, bzw. wieder auf die Regelgeschwindigkeit zurückgeht.

² Mit der zusätzlichen Eingabe von Mindesthaltezeiten können in *RailSys* Haltezeitreserven realisiert werden.

Konflikte

Bei der Konflikterkennung folgen *OpenTrack* und *RailSys* unterschiedliche Ansätze. Die Konflikte, die von den Tools angezeigt werden, werden im Einzelnen dargestellt:

OpenTrack	RailSys
<ul style="list-style-type: none"> • Bremsung für Fahrstraße ¹ • Bremsung für Signal ¹ • Halt am Signal ¹ • Verspätete Abfahrt • Verspätete Ankunft • Verspätete Durchfahrt 	<ul style="list-style-type: none"> • Zugfolgefehler ² • Doppelbelegung ³ • Luftkreuzung-Gegenläufig ⁴ • Luftkreuzung-Gegenläufig-Eingleisig ⁵

Tabelle 10: Konflikte, die angezeigt werden

¹ außerplanmäßig

² Überschneidungen von Sperrzeitentreppen zweier in die gleiche Richtung fahrender Züge auf der freien Strecke.

³ Zugfolgefehler, der in einer Station stattfindet.

⁴ Belegungskonflikte mit einem Gegenzug.

⁵ Belegungskonflikte mit einem Gegenzug auf eingleisiger Strecke.

3.9 Dispositionen

Dispositionsmaßnahmen	OpenTrack	RailSys
Disposition auf Eingleisigen Strecken	✓ ¹	✓ ²
Dynamische Prioritätserhöhung im Verspätungsfall	✗	✓
Einbruchdisposition	✗	✓ ³
Fahrtdisposition	✗	✓ ³
Haltezeitverlängerung	✗	✓ ^{2, 3}
Priorisierung von Zuggattungen / -kategorien	✗	✓
Vorreservierungen von Blöcken	✓	✓ ⁴
Zielgleisänderung bei besetztem Gleis	✓	✓

Tabelle 11: Dispositionsmaßnahmen

¹ Im Gegensatz zu *RailSys*, müssen hier die Blöcke manuell bestimmt werden, die gemeinsam reserviert werden, um einen Deadlock zu verhindern.

² Wird im Bahnhof angewendet, um Behinderungen im Zweirichtungsbetrieb zu verhindern.

³ Wird angewandt, um einen höher priorisierten Zug Vorrang zu gewähren.

⁴ Es ist außerdem möglich, dass für jeden Zug und jedes Signal einzeln eine bestimmte Anzahl an nachfolgenden Blöcken auf einmal reserviert wird (z.B. zur Deadlock Verhinderung).

3.10 Störungen und Verspätungen

Störungsvarianten	OpenTrack	RailSys
Signalstörung	✓	✗
Streckensperrung	✓	✓
Streckenstörung (verminderte Geschwindigkeit)	✓	✗
Witterungsbedingte Störungen	✓ ¹	✗
Zugstörung	✓	✗

Tabelle 12: Störungsvarianten

¹ siehe Kapitel 3.6 unter „Adhäsionsverhalten“

Verspätungsvarianten	OpenTrack	RailSys
Abfahrtszeitverspätung	✓	✓
Einbruchverspätung	✓	✓
Haltezeitverlängerung	✓	✓

Tabelle 13: Verspätungsvarianten

3.11 Simulation und Auswertung

Simulation	OpenTrack	RailSys
Schrittweise Ausführung möglich	✓ ¹	✓ ¹
Schrittweite der synchronen Durchführung [s]	✓ ²	✗ ²
Simulation kann unterbrochen werden	✓ ³	✓ ³
Simulationsgeschwindigkeit einstellbar	✓ ⁴	✓ ⁵

Tabelle 14: Einstellungen zu der Simulation

¹ Bei *OpenTrack* hängt die Schrittweite von der Schrittweite der synchronen Durchführung ab; bei *RailSys* ist die Schrittweite frei wählbar [s]

² *OpenTrack*: Je höher der Wert [0,5-10 s] gewählt wird, umso weniger ist die gebrauchte Rechenleistung und umso schneller läuft die Simulation ab, aber desto ungenauer sind die Berechnungen.

RailSys: Das Handbuch gibt keine Auskunft über die Schrittweite der synchronen Durchführung. [22]

³ Es wird eine Uhrzeit eingegeben, an der die Simulation automatisch unterbrochen wird. Bei *RailSys* kann zusätzlich eingestellt werden, dass die Simulation bei Einbruch eines bestimmten Zuges unterbrochen wird. Bei *OpenTrack* kann die Simulation jederzeit per Knopfdruck angehalten werden.

⁴ In einem Verhältnis [1:1 (Echtzeit) bis zu 60:1] kann eingestellt werden, wie schnell die Simulation ablaufen soll.

⁵ stufenlos, ohne Maßstab

Auswertungsmöglichkeiten	OpenTrack	RailSys
Gleisbelegungsdiagramme der Stationen	✓	✓
Anzahl und Typ der Dispositionsmaßnahmen	✗	✓
Streckenauswertungen	OpenTrack	RailSys
Geschwindigkeitsband der Strecke	✓	✓
Höhenverlauf der Strecke	✓	✓
Kantenbelegungen	✓	✓
Kurvenverlauf der Strecke	✓	✗
Neigungsverlauf der Strecke	✓	✓
Tunnellage in Funktion der gefahrenen Distanz	✓	✗
Kurs- bzw. Zugauswertungen	OpenTrack	RailSys
Beschleunigung in Funktion der gefahrenen Distanz / Zeit	✓	✗ ¹
Energieverbrauch	✓	✗ ¹
Geschwindigkeit in Funktion der gefahrenen Distanz / Zeit	✓	✗ ¹
Leistung in Funktion der zurückgelegten Distanz	✓	✗ ¹
Widerstand in Funktion der zurückgelegten Distanz	✓	✗ ¹
Zugkraft in Funktion der zurückgelegten Distanz	✓	✗ ¹
Auswertung des Bildfahrplanes und der Verspätungen	OpenTrack	RailSys
Alle Abfahrtsverspätungen	✓	✓
Alle Ankunftsverspätungen	✓	✓
Alle Verspätungen	✓	✓
Anteil verspäteter Züge	✗	✓
Anzahl verspäteter Züge	✓	✓
Belastung je Block mit Verspätungsübertragung	✗	✓
Durchschnittliche Verspätung pro Kurs (Zug)	✓	✓ ²
Entwicklung der Verspätung zwischen zwei Stationen	✓	✓

Fahrplan mit Soll-/Ist-Vergleich	✓	✓
Maximale Verspätung pro Kurs (Zug)	✓	✓
Mittlere Haltezeitverlängerung durch Disposition	✗	✓
Mittlere Haltezeitverlängerung durch Störung	✗	✓
Sperrzeitentreppen	✓	✓
Verkettung der Teilzugläufe	✗	✓
Verspätung an den Stationen pro Kurs (Zug)	✓	✓
Verteilung der Verspätungen	✗	✓

Tabelle 15: Auswertungsmöglichkeiten

¹ *RailSys* bietet über die Verknüpfung mit dem Betriebsplanungsprogramm „DYNAMIS“ die Möglichkeiten der Zugauswertungen an.

² bei Ankunft und/oder Abfahrt

4 Vergleich und Bewertung von OpenTrack/RailSys

4.1 Einleitung

Anhand der Tabellen in Kapitel 3 wird in diesem Kapitel näher auf die Unterschiede und die Vor- und Nachteile der beiden Tools eingegangen. Eine tatsächliche Bewertung wird nur vorgenommen, wenn diese universell anwendbar ist. Oftmals werden ausschließlich Vor- und Nachteile herausgearbeitet und es liegt am Leser eine Bewertung zu interpretieren, die sich auf seine, zu bearbeitende Fragestellung bezieht.

Am Ende dieses Kapitel wird auf die Einsatzzweckeignung der Tools eingegangen, um abschließende Aussagen zu treffen für welchen Einsatzzweck welches Tool besser geeignet ist.

4.2 Benutzeroberfläche

Die Qualität der Benutzeroberfläche als Schnittstelle rechnergestütztes Modell/Bearbeiter ist durchaus von Interesse, da es von einer möglichst benutzerfreundlichen, gut strukturierten Programmoberfläche abhängt, wie erfolgreich und zeiteffizient die Einarbeitung in das Tool und vor allem die Bearbeitung diverser Fragestellungen abläuft.

4.2.1 Einarbeitung, Handbuch und Support

Während der Einarbeitung in das Tool **OpenTrack**, fällt es merklich auf, dass die Programmierer im Mittelpunkt den Bearbeiter gesehen haben. Die Programmstruktur ist demnach so aufgebaut, wie der Bearbeiter Schritt für Schritt sein zu bearbeitendes Projekt vorrausichtlich aufbauen wird. Das Handbuch (über 100 Seiten) verfolgt ebenfalls diese lineare Struktur. Daher sind nach wenigen Tagen der strukturelle Aufbau und die Funktionsweisen von *OpenTrack* gelernt. Auch als informatives Nachschlagewerk kann das Handbuch im weiteren Verlauf dienen, da alle Menüpunkte im Anhang zusammengefasst werden. Darüber hinaus bietet das Handbuch Hintergrundinformationen, z.B. zu der Funktion einer Balise oder der Berechnungsgrundlagen der Simulation.

Bei Fragen, die das Handbuch nicht klären konnte, stand ein schneller Support per Email zur Verfügung.

RailSys besteht aus drei Teilprogrammen. Den Infrastrukturmanager, den Fahrplan- und Simulationsmanager und den Auswertungsmanager.

Selbst bei begleitender Nutzung des Handbuches (über 300 Seiten) braucht es mehr Zeit, den strukturellen Aufbau zu durchschauen und die Funktionsweisen kennen zu lernen. *RailSys* ist von der Programmstruktur her nicht gänzlich linear aufgebaut wie *OpenTrack*. Menüpunkte und einzelne Einstellungen sind anfangs nicht immer sofort wieder zu finden. Dies hat zur Folge, dass die optimale Übersichtlichkeit der Programmstruktur von *OpenTrack* nicht erreicht wird. Nach einer erfolgreichen Einarbeitung und praktisches Üben (Projektbearbeitung) lässt sich *RailSys* jedoch effizient bedienen.

Die Support – Abteilung von RMCon konnte übrig gebliebene Fragen in kurzer Zeit aufklären (per Email).

Die Einarbeitung und das Beantworten von Problemen mit Hilfe des Handbuches sind in *RailSys* zeitintensiver als bei *OpenTrack*.
Der Herstellersupport ist bei beiden Tools hervorragend.

4.2.2 Bearbeitung von Projekten

Um einen Überblick zu bieten, wie die Tools von der Bearbeitungsstruktur her aufgebaut sind, werden auf Seite 37 und 38 jeweils ein Organigramm gezeigt.

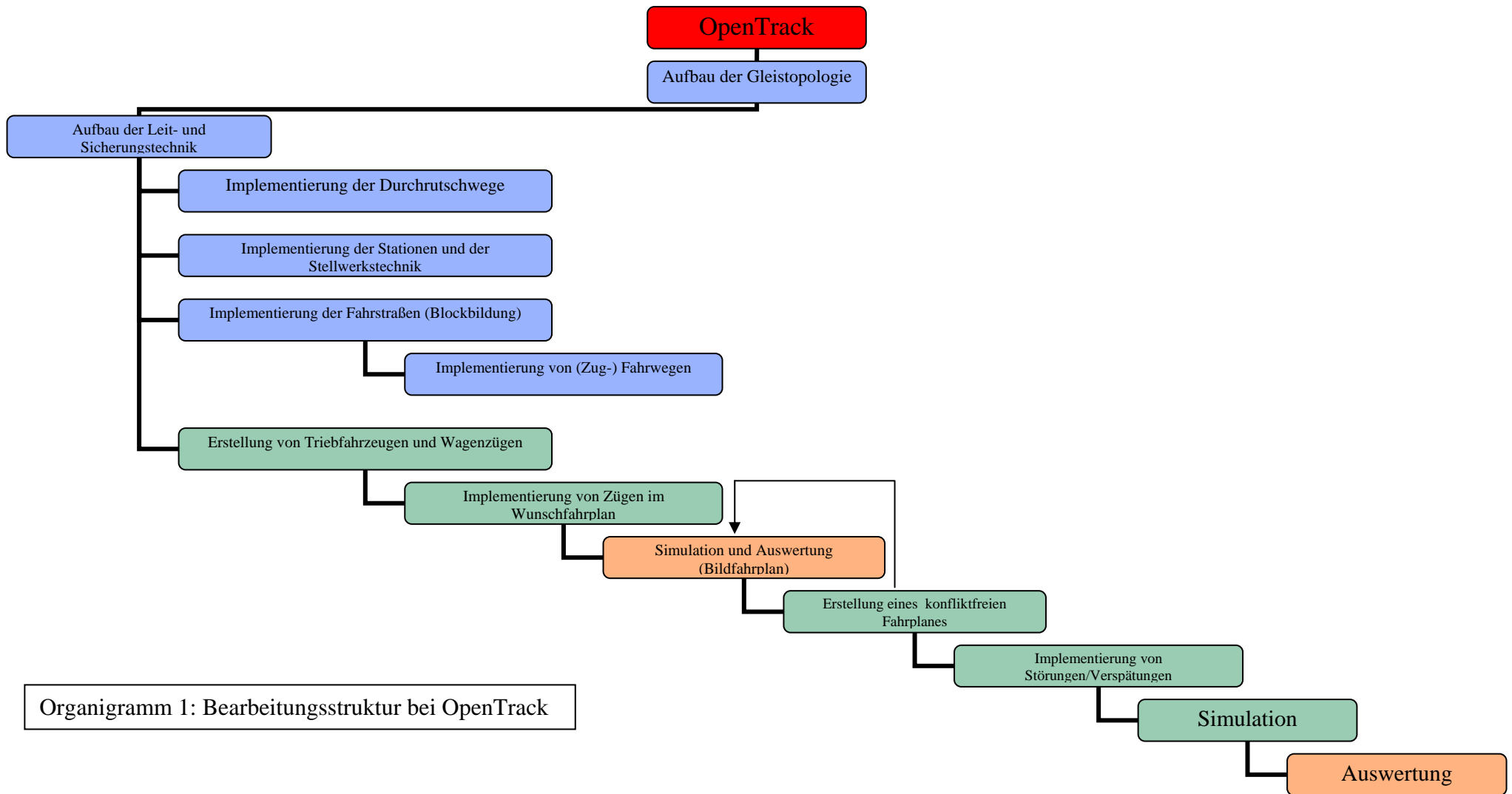
OpenTrack

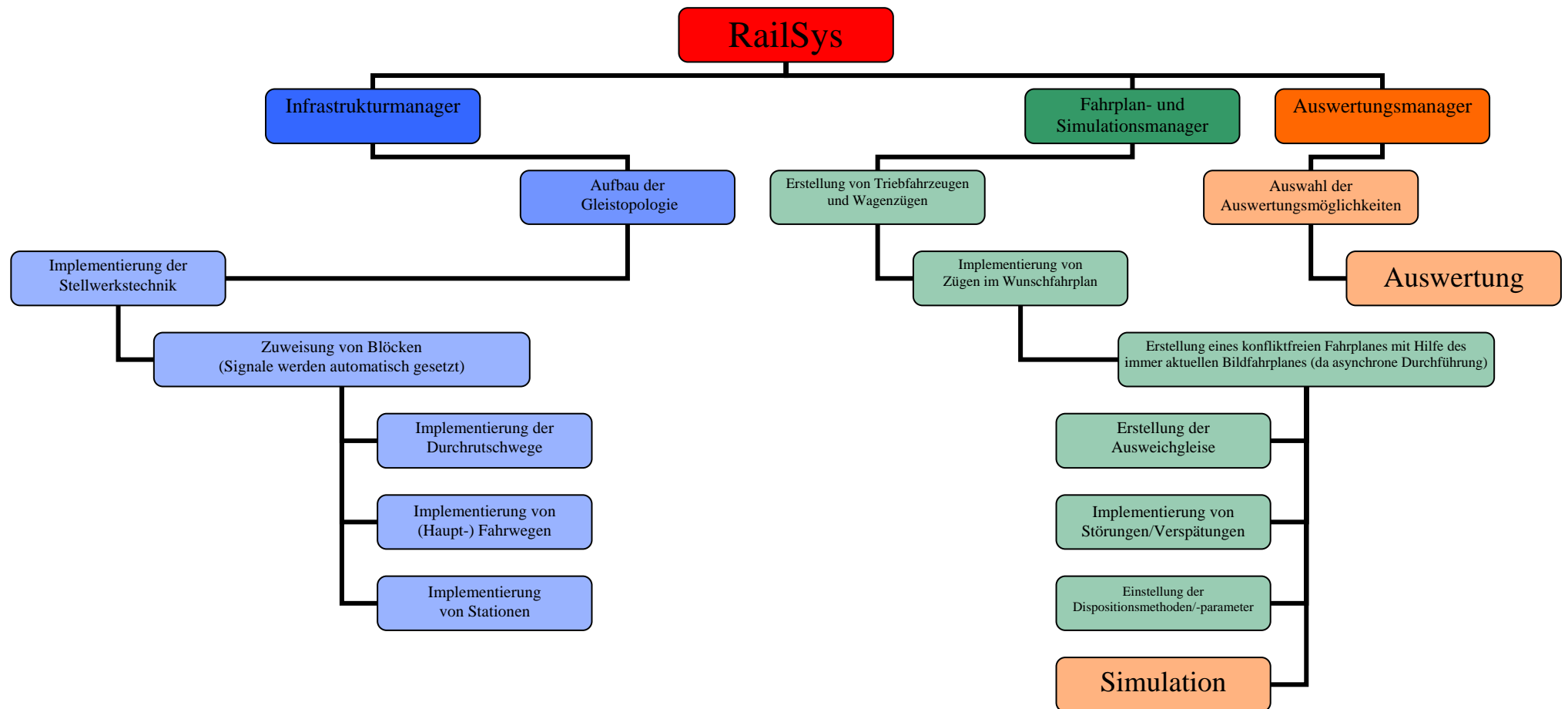
Makroskopische Netzansicht: Ein großer Unterschied zu *RailSys* ist, dass *OpenTrack* keine Netzansichten bietet und die Zoomfunktion nicht geeignet ist, ganze Streckennetze sinnvoll, d.h. die Verkehrsknoten mit ihren Kanten, im Gesamten zu betrachten. In *OpenTrack* werden Netze auf mehrere Arbeitsblätter aufgeteilt, die miteinander verlinkt werden. Damit ist es umständlicher Streckennetze, die mehrere Verkehrsknoten beinhalten, zu modellieren und Simulationen durchzuführen.

Teamarbeit an einem Projekt: Die Infrastruktur kann auf verschiedene Arbeitsblätter angelegt und zu einem späteren Zeitpunkt miteinander verbunden werden. Es ist dadurch theoretisch möglich, dass mehrere Bearbeiter eines Projektes die Infrastruktur an unterschiedlichen Stellen gleichzeitig errichten. Ob sich dies in der Praxis rechnet, bleibt fragwürdig, da der Infrastrukturaufbau nicht der zeitaufwändigste Bearbeitungsschritt ist, sondern die Generierung der Fahrpläne und das Auswerten der Simulationen.

In dieser Arbeit wurde die Bearbeitung von Projekten mit mehreren Mitarbeitern nicht praktisch untersucht.

Synchrone Durchführung: Der Bildfahrplan wird synchron mit der Simulation „mitgeschrieben“. Das bedeutet, dass eine Simulation gefahren werden muss, um überprüfen zu können, ob der aufgestellte Fahrplan konfliktfrei ist. Bei komplexen Fahrplänen werden in der Praxis mehrere Durchläufe benötigt, um einen konfliktfreien Fahrplan auf diese Weise zu erstellen (siehe Organigramm 1 auf Seite 37).





Organigramm 2: Bearbeitungsstruktur bei RailSys

RailSys

Makroskopische Netzansicht: *RailSys* bietet neben der mikroskopischen eine makroskopische Sicht an und somit den Vorteil, bei zu modellierenden Netzen mit mehreren großen Verkehrsknoten nicht die Übersicht zu verlieren. Sowohl im Infrastrukturmanager als auch im Fahrplan- und Simulationsmanager lässt sich jederzeit zwischen dem Netz- und Streckenmodus hin- und herschalten.

Teamarbeit an einem Projekt: Beim Aufbau der ortsfesten Infrastruktur wird zwischen so genannten globalen Bereichen und Strecken unterschieden. Ein globaler Bereich ist ein Bereich der für mehrere Nutzerbezogene Arbeitsblätter zur Verfügung steht. Globale Bereiche können vom Nutzer definiert werden und sind in der Regel Verkehrsknoten, von dem in der Regel mehrere Strecken abzweigen. Auf diese Weise können mehrere Modellierer unabhängig von einander unterschiedliche Strecken oder Netzabschnitte ausgehend von dem Globalen Bereich bearbeiten. D.h. den Infrastrukturaufbau durchführen, aber auch die Fahrplangenerierung und Simulationen für seinen Bereich vornehmen, wenn der Fahrplan nicht von anderen Bereichen abhängt.

In der Netzansicht werden alle Strecken zusammengefügt angezeigt und es können Simulationen für das gesamte Netz durchgeführt werden.

Asynchrone Durchführung: Die Erstellung eines konfliktfreien Fahrplanes ist möglich ohne theoretisch eine einzige Simulation durchführen zu müssen, da der (Bild-)Fahrplan und die angezeigten Konflikte bei jeder zeitlichen Änderung aktualisiert werden (siehe Organigramm 2, Seite 38).

RailSys ermöglicht es Netze bis zum unendlichen Ausmaßes modellieren zu können [Beschränkung: Rechnerleistung]. Simulationen können dort durchgeführt werden, wo sie gewünscht werden (an einer oder mehrere Strecken oder im gesamten Netz). Bei größeren Netzen empfiehlt sich *RailSys* mit erhöhter Übersicht (makroskopische Netzansicht) und die Möglichkeit mehrere Bearbeiter in einem Projekt sinnvoll involvieren zu können. Die Erstellung eines Fahrplanes wird bei *RailSys* durch die asynchrone Durchführung erleichtert.

4.3 Leit- und Sicherungstechnik und Fahrstraßeneinstellungen

Bei der Signaltechnik verfolgen *OpenTrack* und *RailSys* in der Handhabung unterschiedliche Ansätze:

Bei dem Aufbau eines Signalsystems werden bei *RailSys* zu erst die Fahrstraßen angelegt. Die Signale werden automatisch implementiert. Die Vorsignale werden nach einem definierten Wert automatisch, nicht symbolunterstützt gesetzt. Bei Abweichungen können diese auch manuell, symbolunterstützt modelliert werden.

Bei *OpenTrack* wird als erstes jedes einzelne Signal symbolunterstützt auf der Arbeitsfläche modelliert. Danach werden die Fahrstraßen zugeteilt.

Der Vorteil bei ***OpenTrack*** liegt in der Variabilität der Signalsysteme (siehe Tabelle 3 und 4):

Es besteht die Möglichkeit Mehr-Aspekt-Signalisierung, ETCS Level 1 und 2, sowie LZB zu modellieren. Besonderes Augenmerk wurde auf das System der Schweiz (SBB) und der Niederlande (NS) gelegt. Um den Rangierbetrieb abbilden zu können, werden Rangierfahrstraßen gebildet. Ausserdem können nähere Einstellungen, wie die Befreiungsgeschwindigkeit für Balisen und die Distanz, aus der das Signal gesichtet werden kann, getroffen werden. Bei diesen groß angelegten Möglichkeiten ist die fehlende Modellierung von dem PZB/Indusi – Sicherungssystem negativ auffallend.

Mit der neuesten Version (V. 1.3.16) von *OpenTrack* ist es nun möglich Bahnübergänge symbolunterstützt zu modellieren. Dies ist ein gutes Beispiel für die ausgeprägte Fähigkeit der symbolunterstützten Modellierung.

RailSys verfolgt in erster Linie ausschließlich die Systeme, die in Deutschland benutzt werden, wie die PZB/Indusi, H/V – System und LZB. Darüber hinaus können das Dänische ATC – System und das „Moving - Block“ – System realisiert werden. Die Mehr-Aspekt-Signalisierung kann von der Funktion her mit der Mehrabschnittssignalisierung modelliert werden, mit der an einem Signal angezeigt wird, wie viele Blockabschnitte noch frei sind. Obwohl Rangiersignal-Symbole implementiert werden können, ist es dennoch nicht möglich Rangierfahrstraßen anzulegen. Dies, die fehlende Modellierung eines ETCS Level 2 – Systems und die indirekte Implementierung von Langsamfahrstellen (ausschließlich über die streckenbezogene Geschwindigkeit möglich) sind gegenüber *OpenTrack* Nachteile.

Anmerkung zum Handling: Das anlegen von Fahrstraßen erfolgt bei *OpenTrack* manuell. D.h. zu erst werden so genannte „Routes“ festgelegt, die gleich den Hauptsignalabständen sind. Des Weiteren werden „Pfade“ definiert, die im Normalfall vom Ausfahrtsignal des einen Bahnhofes zum Einfahrtsignal des nächsten reichen. Letztendlich werden über die

Verknüpfung der „Pfade“ so genannte „Itineraries“ angelegt, die den Fahrweg eines oder mehrerer Züge (z.B. Züge im Taktverkehr) darstellt. Das manuelle Anlegen von Fahrwegen kann sehr umständlich, unübersichtlich und langwierig sein, wenn die bearbeitete Strecke mehrere Arbeitsblätter umfasst. In *RailSys* hingegen werden die Fahrwege schnell und komfortabel über die Auswahl der zu durchfahrenden Bahnhöfe angelegt.

Bei *RailSys* geht die Implementierung der Fahrwege direkter und daher auch schneller. *OpenTrack* kann mehrere verschiedene Signaltypen und somit auch verschiedene Signalsysteme modellieren, die *RailSys* nicht oder nur umständlicher modellieren kann. Somit liegt hier die Wahl der Software abhängig von den „Wünschen“, der zu simulierenden Signalsysteme, der Kunden ab.

4.4 Zugkompositionen

Die Daten zur Modellierung der rollenden Infrastruktur dienen ausschließlich als Berechnungsgrundlage der Fahrdynamik. Da kein Einblick in die Algorithmen zur Fahrdynamikberechnung möglich war, kann keine abschließende Aussage darüber getroffen werden, inwieweit die einzelnen Attribute darauf Einfluss nehmen. Somit ist ein objektiver Vergleich nicht möglich. Der potentielle Nutzer sollte Entscheiden, welchen Attributen er einen höheren Stellenwert gibt. Welche Eingabedaten zur Verfügung stehen, ist in Tabelle 5 und 6 zu betrachten.

Bei beiden Tools ließ die Eingabe und Bearbeitung der Daten keine Umständlichkeiten, Missverständnisse oder weitere Schwierigkeiten erkennen. Hervorzuheben ist die Möglichkeit Magnetbahnen in *OpenTrack* zu modellieren und die fehlende Höchstgeschwindigkeitsbegrenzung durch den Wagenzug bei *RailSys*.

4.5 Berechnungsgrundlagen der Fahrdynamik

Wie in Tabelle 7 zu erkennen, obliegt es dem Kunden von *OpenTrack* auf eine erhöhte Anzahl von Möglichkeiten zurückgreifen zu können, um Einfluss auf die Fahrdynamik zu nehmen. Dies ist ein Beleg für die Detailliertheit der Modellierung in *OpenTrack*.

Für OpenTrack und RailSys gilt bei der Berechnung der Fahrdynamik:

- Aus der Max. Zugkraft, den Fahrwiderständen und der Topologieparametern wird die maximal mögliche Beschleunigung pro Zeitschritt ermittelt.
- Durch Integration wird die Geschwindigkeitsfunktion des Zuges ermittelt.
- Durch nochmalige Integration wird die zurückgelegte Strecke ermittelt.
- Belegte Abschnitte, Stellwerkschaltzeiten oder einschränkende Fahrbegriffe an Signalen haben Einfluss auf das Verhalten der Züge.
- Als numerisches Verfahren für das Lösen der Bewegungsgleichungen der Züge kommt ein Modell mit der Formel von Euler zum Einsatz.

[Quelle: 21]

Zu der Berechnung der Fahrzeit wird mittels eines Versuchsszenarios das Verhalten beider Tools in Kapitel 4.10.2 überprüft.

4.6 Fahrplangenerierung

An dieser Stelle überzeugt erneut *OpenTrack* mit seiner Vielfalt Vorgänge im Bahnbetrieb modellieren zu können: Züge können getrennt und vereinigt werden. Z.B. kann aus einem (modellierten) Depot ein Triebfahrzeug entsandt werden, um den Wagenzug eines anderen Zuges mittels Kupplungsvorgang zu „übernehmen“.

Die Fahrplanerstellung an sich ist jedoch mit *RailSys* deutlich besser zu handhaben, da diese asynchron arbeitet und entscheidende Vorteile in den Punkten Übersichtlichkeit und die Menge der angezeigten Informationen bietet (siehe unten).

OpenTrack bietet hierbei eine synchrone Durchführung, d.h. es muss für die Validierung des Fahrplanes mindestens eine Simulation durchgeführt werden. Essentielle Informationen wie der Ist-Fahrplan, Verspätungen etc. können erst nach der Simulation eingesehen werden. Dies verursacht einen erhöhten Aufwand komplexe Fahrpläne mit vielen Verknüpfungen auszuarbeiten.

RailSys zeigt folgende Informationen an, die asynchron aktualisiert werden:

- Zugeigenschaften
- Fahrplan
- Laufweg

- Zugfolgezeiten
- Bildfahrplan
- Streckenband
- Neigungsband
- Gleisbelegungen
- Geschwindigkeitsbänder der Züge und der Strecke
- Konflikte
- Ausweichgleise
- Dispositionen
- Verspätungen

Auf Grund der asynchronen Durchführung und der Menge an Daten, die übersichtlich dargestellt werden und leicht zu bearbeiten sind, ist *RailSys* bei der Fahrplangenerierung und –Bearbeitung *OpenTrack* vorzuziehen.

Konflikte

Da die Konflikte ebenfalls asynchron angezeigt werden, ist es theoretisch möglich einen konfliktfreien Fahrplan zu erstellen ohne eine einzige Simulation durchgeführt zu haben.

Eine Simulation durchzuführen ist trotzdem nützlich, um, besonders bei der Deadlock – Vermeidung in Zweirichtungsbetriebenen Streckenabschnitten, Dispositionsmaßnahmen eindeutig zu evaluieren.

Wie in Kapitel 3.8 schon aufgeführt, gehen die Tools unterschiedliche Wege. *OpenTrack* zeigt die Folgen eines Konfliktes an, jedoch nicht den Grund des Zustandekommens. Besonders bei knapp berechneten Zugfolgezeiten erweisen sich die angezeigten Konflikte bei *RailSys* als hilfreicher.

4.7 Dispositionen

OpenTrack bietet kaum Möglichkeiten dispositiv in den Bahnbetrieb einzugreifen. Um die Deadlock – Problematik zu bewältigen, muss an jeder Problemstelle eingegriffen werden, in dem angegeben wird, welche Fahrstraßen gemeinsam reserviert werden müssen.

Bei **RailSys** können zusätzlich zu der großen Auswahl an Dispositionsmaßnahmen die Parameter für die Dispositionsmethoden verändert werden, um die Schwellwerte des Eingriffes der Disposition optimal festlegen zu können. So muss nicht an jeder Problemstelle ein Eingriff erfolgen, da dies über die Parameter geregelt werden kann.

Anmerkung zum Handling: Während bei *RailSys* die **Ausweichgleise** in einem eigenen Menü definiert werden, müssen bei *OpenTrack* eigens Fahrstraßen angelegt werden, die die Ausweichgleise beinhalten. Diese niedriger priorisierten Fahrstraßen werden den Zügen zugewiesen. So wechselt der Zug auf das Ausweichgleis, wenn die Fahrstraße mit hoher Priorität („Wunsch“ - Bahnhofsgleis) belegt ist. Das zuweisen der „Ausweichfahrstraßen“ kann besonders bei größeren Strecken, die über mehrere Arbeitsblätter verteilt sind umständlich sein.

4.8 Störungen und Verspätungen

Beide Tools bieten die gleichen Varianten an, Verspätungen in den Fahrplan zu implementieren.

OpenTrack kann vier Störungen mehr simulieren und ist somit flexibler als *RailSys*. *RailSys* beschränkt sich dabei auf Streckensperrungen (siehe Tabelle 12), mit dem Vorteil, dass bei Streckensperrungen die Umleitung von Zügen direkt getestet und (z.B. nach Prioritäten) optimiert werden kann.

OpenTrack bietet eine größere Auswahl an Störungen, die zu modellieren sind und ist deshalb *RailSys* in diesem Bereich überlegen.

Bei zu simulierenden Streckensperrungen mit zu umleitenden Zügen ist *RailSys* auf Grund der oben genannten Möglichkeiten *OpenTrack* vorzuziehen.

4.9 Simulation und Auswertung

Simulation

OpenTrack bietet neben der rein rechnerischen Simulation einen animierten Simulationsmodus an, der

- belegte Kanten,
- reservierte Fahrstraßen,
- die Weichenstellungen,

- Durchrutschwege und
- die Zugnummern

(wahlweise in Echtzeit) anzeigt. *RailSys* zeigt im Animationsmodus ausschließlich belegte Fahrstraßen an. Dies kann den Nachteil der eingeschränkten Konflikterkennung von *OpenTrack* teilweise wieder wettmachen, da mit Hilfe der Animation Konflikte und Probleme der Zugläufe besser erkannt werden als mit der Simulation in *RailSys*. Bei größeren Projekten mit vielen Zugfahrten ist der Animationsmodus jedoch nicht zu empfehlen, da sowohl die Übersichtlichkeit als auch besonders die Rechnerkapazitäten leiden.

Neben der Einzelsimulation bietet ***RailSys*** die so genannte Mehrfachsimulation an, mit der nacheinander gestörte Fahrpläne durchsimuliert werden. Konfliktfreie Fahrpläne können mit den in Kapitel 3.10 aufgezählten Verspätungen versehen. Bei der Verteilung der Verspätungen stehen zwei Arten zur Verfügung: negative Exponentialverteilung und empirische Verteilung.

Diese so erzeugten gestörten Fahrpläne stellen in der Realität verschiedene Betriebstage dar, an denen durch unterschiedlichste Einflussparameter (Fahrgastzahlen, Wetter etc.) Unregelmäßigkeiten gegenüber dem geplanten Fahrplan auftreten.

OpenTrack bietet eine stark animierte, in Echtzeit laufende Simulation an, mit der Konflikte erkannt werden können. *RailSys* liefert differenzierte Konfliktmeldungen in Textform. Es lässt sich nicht eindeutig sagen, welches Konzept besser ist. Diese Entscheidung liegt beim potenziellen Benutzer und den etwaigen Fragestellungen. Bei der Überprüfung gestörter Fahrpläne auf Stabilität ist *RailSys* mit der Mehrfachsimulation zu bevorzugen.

Auswertung

Etliche Auswertungen werden bei ***RailSys*** schon bei der Fahrplangenerierung angezeigt, da diese asynchron abläuft (siehe 4.6). Weitere Auswertungen werden im Anschluss der Mehrfachsimulation gezeigt (siehe Tabelle 15). Auch erweist sich der Auswertungsmanager als eine komfortable Plattform mögliche Auswertungen in Diagrammen und Tabellen darzulegen, da diese, von der Windows Oberfläche bekannt, mittels Menüleisten und Icons aufgerufen werden.

Bei ***OpenTrack*** werden die Auswertungen in einem vorher definierten Ordner gespeichert und können mittels Excel aufgerufen werden. Um Diagramme mit *OpenTrack* anzeigen zu lassen, werden diese auf der Arbeitsoberfläche (neben der Gleistopologie) einzeln angelegt.

Quantitativ liegen beide Tools auf einer Ebene (siehe Vergleich der Tabelle 15).

Auf Grund der Übersichtlichen Anordnungen durch den Auswertungsmanager und der asynchronen Durchführung erweisen sich die Auswertungen bei *RailSys* als einfacher zu handhaben als bei *OpenTrack*.

4.10 Überprüfung der Einsatzzweckeignung

4.10.1 Einleitung

Abschließend soll in diesem Abschnitt die anfangs aufgestellte Frage geklärt werden in wie weit die Tools für die, von beiden Herstellern angegebenen Einsatzzwecke (siehe auch Kapitel 2.2) geeignet sind. Untersucht werden folgende Einsatzzwecke:

- Berechnung von Fahrzeiten
- Nachweis von Infrastrukturbedarf und der sicherungstechnischen Ausrüstung
- Fahrplankonstruktion
- Stabilitäts- und Machbarkeitsuntersuchungen von Fahrplänen
- Untersuchungen zum Verhalten des Netzes bei Störungen
- Planung von Umbauphasen und Langsamfahrstellen
- Entwicklung von Dispositionsregeln- und -Strategien
- Simulation von Magnetbahnsystemen

4.10.2 Berechnung von Fahrzeiten

Überprüfung der Fahrzeitberechnung im Vergleich

Fragestellung: Um mittels Simulationen Fragen aus dem Eisenbahnbetrieb beantworten zu können, ist es Grundvoraussetzung, dass die Zugfahrten realitätsgerecht abgebildet werden, d.h. die Fahrzeiten müssen realitätsnah berechnet werden.

Die Voraussetzung für eine Realitätsentsprechende Fahrzeitberechnung ist eine richtige Eingabe der Daten, die als Berechnungsgrundlage der Fahrdynamik dienen. Dies liegt in der Hand des Bearbeiters, jene Daten vollständig und richtig einzugeben.

Ob das Tool jedoch auch mit vollständiger Datengrundlage realitätsnah modelliert und simuliert, wird mit diesem Szenario überprüft.

Ausführung: Da mir keine Referenz zur Verfügung stand, d.h. keine in der Realität vorkommende Zugfahrt, die mit der Simulation verglichen werden kann, wird ausschließlich in beiden Tools eine virtuelle Zugfahrt entwickelt und die Fahrzeit miteinander verglichen.

Vorraussetzung für ein Ergebnis, welches Schlüssig ist, ist, dass die Dateneingabe äquivalent vorgenommen wird und möglichst nur die Pflichtdaten zur Berechnung eingegeben werden.

Zielstellung: Sind die berechneten Fahrzeiten beider Tools gleich (unter Beachtung einer Toleranz von max. 5%), kann davon ausgegangen werden, dass jene Fahrzeiten der Realität sehr nahe kommen (wiederum unter Toleranzbeachtung).

Ortsfeste Infrastruktur: Die Strecke des Szenarios gleicht einer Regionalstrecke, wie sie in der Realität des Öfteren vorkommt. Eine eingleisige Strecke verbindet sieben Bahnhöfe und einen Haltepunkt in Reihe miteinander. Die gefahrene Strecke beträgt rund 50 Km. Die installierte Leit- und Sicherungstechnik besteht aus einem gängigen Haupt-/Vorsignal – System ohne Absicherungssystem. Ein Teil der Strecke ist dabei mit kombinierten Signalen ausgestattet. Auf Neigungen, Kurvenradien und Tunnel wird verzichtet, um eventuelle abweichende Ergebnisse leichter auf bestimmte Eingabedaten beziehen zu können. Ein Abbild der Strecke mit dem Fahrweg der Versuchsfahrten (gelb gekennzeichnete Streckenverlauf) ist in Abbildung 3 zu sehen.

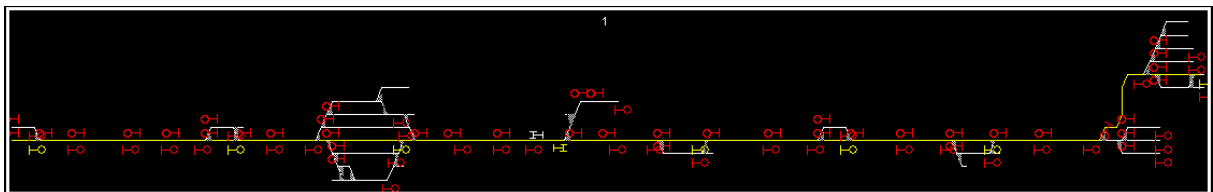


Abbildung 7: Streckenverlauf, entnommen aus RailSys

Rollende Infrastruktur: Um auch hier potentielle Fehlerquellen von vornherein ausschließen zu können, wird auf die Modellierung von Wagenzügen verzichtet und nur ein Triebfahrzeug erstellt. Die Daten des Triebfahrzeuges sehen folgendermaßen aus:

- Länge: 20 Meter
- Masse und Reibmasse: 120 Tonnen
- Höchstgeschwindigkeit: 80 Km/h

- Massenzuschlag: 6%
- Z/V – Diagramm: 370 Kn bis 25 Km/h, dann abfallende Hyperbel bis 80 Km/h
- Bremsverzögerung: $-0,6 \text{ m/s}^2$
- Widerstände: keine

Anmerkung zu den folgenden Versuchsfahrten:

- Einbruch der Züge: Ausfahrtsignal des ersten Bahnhofes
- Ausbruch der Züge: Haltesignal des letzten Bahnhofes

Attribute		Fahrplan 1	Fahrplan 2	Fahrplan 3	Fahrplan 4
Einbruchszeit		08:00:00 Uhr	08:00:00 Uhr	8:00:00 Uhr	8:00:00 Uhr (08:00:30 Uhr für OpenTrack) ¹
Einbruchsgeschwindigkeit		80 km/h	80 km/h	80 km/h	0 km/h
Haltezeiten		Keine	30 sek. an einem Haltepunkt inmitten der Strecke	30 sek. an allen Stationen, außer erster & letzter Station	30 sek. an jeder Station
Ausbruchsgeschwindigkeit		80 km/h	80 km/h	80 km/h	0 km/h
Ausbruchszeit	OpenTrack	08:36:22 Uhr	08:37:17 Uhr	08:41:50 Uhr	08:42:58 (08:43:28 Uhr) ²
	RailSys	08:36:36 Uhr	08:37:30 Uhr	08:41:54 Uhr	08:43:18 Uhr

Tabelle 16: Fahrplantabelle zur Fahrzeitmessung

¹ Bei *OpenTrack* ist die Abfahrtszeit gleich der Einbruchszeit. Um den Halt von 30 Sek. simulieren zu können, wurde die Abfahrtszeit auf 08:00:30 gesetzt. Bei *RailSys* geschieht dies automatisch, da die Ankunftszeit gleich der Einbruchszeit ist.

² Bei *OpenTrack* ist die Ausbruchszeit gleich der Ankunftszeit im letzten Bahnhof. Somit muss der Halt von 30 Sekunden aufsummiert werden

Interpretation der Ergebnisse:

- Zeitdifferenz in Fahrplan 1: 14 Sekunden
- Zeitdifferenz in Fahrplan 2: 13 Sekunden
- Zeitdifferenz in Fahrplan 3: 4 Sekunden
- Zeitdifferenz in Fahrplan 4: - 10 Sekunden

Bei einer Fahrzeit von über 36 Minuten liegt eine Differenz von 14 Sekunden bis – 10 Sekunden im Toleranzbereich (Abweichung < 1%) und ist somit zu akzeptieren.

Die Fahrzeiten werden von beiden Tools ordnungsgemäß berechnet.

Ergebnisse bezüglich Handhabung:

Bis auf die Einbruchs- und Ausbruchszeitverschiebung (siehe oben „Fahrplan 4“) in *OpenTrack*, die anfangs für leichte Verwirrung gesorgt hat, ist letztendlich bei der Durchführung dieses Szenarios in beiden Tools keine weiteren nennenswerte „Probleme“ aufgetreten.

Die Durchführung dieser Fahrpläne bestätigt die obigen Aussagen, dass die asynchrone Durchführung der Fahrplanvalidierung in *RailSys* eindeutige Vorteile im Bereich des Handlings erbringt. Es war in *RailSys* nicht nötig eine einzige Simulation durchzuführen. Dies hat die Vorgänge beschleunigt.

4.10.3 Nachweis von Infrastrukturbedarf und der sicherungstechnischen Ausrüstung

Beide Tools sind durchaus in der Lage durch Simulationen den Nachweis möglichen Infrastrukturbedarfs zu erbringen. Welcher Infrastrukturbedarf seitens der Tools überprüft werden kann, hängt von der zu modellierenden Infrastruktur ab. Da **OpenTrack** mehr Möglichkeiten offenbart verschiedene Infrastruktur zu modellieren, hat es gegenüber **RailSys** einen Vorteil in diesem Einsatzzweck (siehe Aufzählung der zu modellierenden Infrastruktur in Tabelle 3).

4.10.4 Fahrplankonstruktion

An dieser Stelle werden die wesentlichen Vor- und Nachteile der beiden Tools bezüglich der Fahrplankonstruktion noch einmal in geordneter Form im Vergleich aufgeführt:

	OpenTrack	RailSys
Vorteile	<ul style="list-style-type: none">• Züge können getrennt und vereint werden	<ul style="list-style-type: none">• asynchrone Durchführung• Gültigkeit der Fahrpläne kann festgelegt werden
Nachteile	<ul style="list-style-type: none">• ausschl. synchrone Durchführung• Fahrwege müssen manuell eingegeben werden	

4.10.5 Stabilitäts- und Machbarkeitsuntersuchungen von Fahrplänen

In beiden Tools können Fahrpläne mit folgenden Verspätungen versehen werden:

- Einbruchverspätungen
- Haltezeitverspätungen
- Abfahrtszeitverspätungen

In **OpenTrack** werden die Verspätungen definiert (keine Zufallswerte) oder als Zufallsverspätungen mit definiertem Mittelwert (Exponentialverteilung) pro Zug und Station verteilt.

RailSys bietet hierbei die Exponentialverteilung und die empirische Verteilung an. Die Störungen werden aus den Elementen Verspätungsart (siehe oben), Verteilung, Zugmenge und Station gebildet. Die Zugmenge kann nach Gattungen oder nach Takten zusammengefasst werden. Beliebige viele Fahrplanstörungen können so definiert werden und komfortabel mit der Mehrfachsimulation durchgerechnet werden.

Bei Stabilitäts- und Machbarkeitsuntersuchungen ist <i>RailSys</i> auf Grund der Störungsdefinition und der Mehrfachsimulation eher zu empfehlen.

4.10.6 Untersuchungen zum Verhalten des Netzes bei Störungen und Planung von Umbauphasen und Langsamfahrstellen

RailSys ist ausschließlich darauf ausgelegt Streckensperrungen zu modellieren und mit der Einzelsimulation zu simulieren. Streckensperrungen können auch mit *OpenTrack* durchgeführt werden, aber ausschließlich *RailSys* bietet über die zeitliche Einteilung der Sperrung hinaus das Umleiten und testen der umgeleiteten Züge an. Somit ist *RailSys* für die Planung von Umbauphasen besser geeignet.

OpenTrack leistet dagegen die direkte Modellierung von Signalstörungen, Streckenstörungen (Langsamfahrstellen), witterungsbedingte Störungen und Zugstörungen. Da *RailSys* Langsamfahrstellen nur indirekt über streckenbezogene Geschwindigkeiten modellieren kann, ist *OpenTrack* für die Planung von Langsamfahrstellen besser geeignet.

4.10.7 Entwicklung von Dispositionsregeln und –strategien

OpenTrack besitzt ausschließlich Dispositionsmöglichkeiten zur Deadlock-Vermeidung und zur Bestimmung von Ausweichgleisen in Bahnhöfen. Zur Entwicklung von Dispositionsregeln und –Strategien ist *OpenTrack* daher nicht geeignet und auch nicht angedacht gewesen. Welche Dispositionsmaßnahmen in **RailSys** zur Verfügung stehen, um Regeln und Strategien zu entwickeln, ist in Tabelle 11 zu lesen.

4.10.8 Simulation von Magnetbahnsystemen

Die Modellierung dieses modernen Verkehrssystems ist **OpenTrack** vorbehalten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Beide Tools haben durchaus ihre Daseinsberechtigung, da sie als mikroskopische Eisenbahnbetriebssimulationen elementare Unterschiede aufweisen und dadurch ihre Zwecke unterschiedlich gut erfüllen:

OpenTrack überzeugt mit seiner leicht Verständlichen, linearen Programmstruktur. Dadurch fallen die Einarbeitung in das Tool und das Erlernen des Infrastrukturaufbaus leichter aus. Außerdem wird mit *OpenTrack* eine genauere Modellierung der Infrastruktur erreicht. Mit der Simulation von Magnetbahnsystemen, verschiedenen Signal-Systemen, Bahnübergängen, Rangierfahrstraßen, das Trennen/Vereinen von Zügen, etc. zeigt sich die Flexibilität der Software. Theoretisch lassen sich deshalb mehr Problemstellungen lösen. Allerdings nur wenn sich die Größenordnung der zu modellierenden Gleistopologie in Grenzen hält, da bei größeren Strecken oder Netzen sowohl die Übersichtlichkeit als auch die Berechnungsgeschwindigkeit der Simulation an ihre Grenzen stößt.

Dies ist der große Pluspunkt von **RailSys**: Da es eine makroskopische Netzansicht anbietet und die Gleistopologie des Projektes in globale Bereiche und Strecken getrennt werden kann, lassen sich ganze Netze modellieren und das in moderater Geschwindigkeit, wenn die Möglichkeit genutzt wird mit mehreren Bearbeitern an einem Projekt zu arbeiten.

Bei der Generierung und Überprüfung auf Stabilität komplizierter Fahrplankonstruktionen sollte die Wahl der Eisenbahnbetriebssimulation auf *RailSys* fallen. Hier überzeugt die asynchrone Durchführung mit ihrer guten Übersichtlichkeit, der Zeiteffizienz der Bearbeitung und der großen Auswahl an Dispositionsmöglichkeiten.

Letztendlich lässt sich sagen, dass die Tools unterschiedliche Ansätze verfolgen:

Mit **OpenTrack** lassen sich sehr viele Systeme und Vorgänge direkt modellieren und mit jedem Update kommen neue hinzu. Dadurch schafft es *OpenTrack* vielleicht neue Fragestellungen zu entdecken, die mit Simulationen bearbeitet werden können.

RailSys hingegen beschränkt sich mehr um das Erreichen der heutigen Ziele, die mit Simulationen erreicht werden sollen. Daher kann nicht jedes Detail modelliert werden, sondern geht, wenn nötig, „nur“ in einer gröberen (Zeit-) Verteilung mit ein, wie z.B. witterungsbedingte Störungen über die Verspätungsverteilung abgebildet werden können.

OpenTrack ist daher als ein „mikroskopisches“ arbeitende Tool anzusehen als RailSys.

Über diese Arbeit hinaus, wäre es interessant zu wissen, welche Vorteile durch die Verknüpfung zweier Tools entstehen würden. Besonders die Verknüpfung von *OpenTrack* mit *FBS* ist von Interesse, da das Manko der Fahrplangenerierung durch die asynchrone

Fahrplanbearbeitung von *FBS* vermutlich vollständig wettgemacht werden würde. Auch die Verknüpfung von *RailSys* mit *Nemo* ist von Interesse, um das Funktionieren von rechnerleistungssparenden makroskopischen Netzuntersuchungen auf mikroskopischer Grundlage untersuchen zu können.

Grundlage solch einer Verknüpfung ist der verlustfreie Datenaustausch (Infrastruktur, Fahrpläne) zwischen den Tools. Dieser kompatible Datenaustausch soll mit der neu entwickelten Datenschnittstelle RailML möglich sein. Diese ist auf Funktionalität zu untersuchen.

Da die Tools unter ständiger Weiterentwicklung stehen und sich besonders bei *OpenTrack* während der Erstellung dieser Arbeit viel getan hat, ist es zu empfehlen einen Vergleich zu späterer Zeit noch einmal durchzuführen.

Auf dem Markt existieren noch weitere Simulationstools für den Eisenbahnbetrieb, die ähnliche Ziele wie *OpenTrack* und *RailSys* verfolgen und somit ebenfalls für eine vergleichende Untersuchung von Interesse sind, wie z.B. die Simulationssoftware „Simu VII“.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Robert Simmeth
Vgl. *Mit geeigneten Telematik-Systemen den Schienengüterverkehr der Zukunft gestalten*
Seite 717, Leitartikel ETR Ausgabe November 2004
[Hamburg, 2004]
- [2] Institut für Verkehrsführung
Fahrzeugsteuerung
Vgl. *Wissenschaftliche Arbeitsschwerpunkte*, und
Seite 25, *Statusbericht 2004*
[Braunschweig, 2004]
- [3] Piehler/Zschiesche
Simulationsmethoden
[Thun/Frankfurt a. Main, 1978]
- [4] Kaup
*Simulation im Luftverkehr, Analyse – Modellierung
– Implementierung – Ergebnisse*
[Wiesbaden, 1996]
- [5] Möller
*Modellbildung, Simulation und Identifikation
dynamischer Systeme*
[Berlin/Heidelberg, 1992]
- [6] Warninghoff, Ferchland
*Nutzung von Simulationen zur Unterstützung der
betrieblichen Infrastrukturplanung*
ETR Ausgabe Juli/August 2004
[Hamburg, 2004]
- [7] Kettner/Sewcyk/Hunold
*Verknüpfung von mikroskopischen und
makroskopischen Simulationsmodellen des
Schienenverkehrs*
Eisenbahningenieur 2/2004
[Hamburg, 2004]
- [8] IVT der ETH Zürich
*OpenTrack – Betriebssimulation von
Eisenbahnnetzen*
www.ivt.baug.ethz.ch/oev/opentrack_d.html
[Zürich, Stand Nov. 2004]

- [9] Hürlimann *Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen - Zusammenfassung*
ETH Dissertation Nr. 14281
- [10] iRFP *Bildfahrplanprogramm FPL*
<http://www.irfp.de/deutsch/fbs/fpl.html>
[Leipzig, Stand: 14.04.2004]
- [11] iRFP *Bahnhofsfahrordnungsprogramm BFO*
<http://www.irfp.de/deutsch/fbs/bfo.html>
[Leipzig, Stand: 14.04.2004]
- [12] iRFP *NETZ*
<http://www.irfp.de/deutsch/fbs/netz.html>
[Leipzig, Stand: 14.04.2004]
- [13] iRFP *Fahrplanbearbeitungssystem FBS - Anleitung*
[Leipzig, Ausgabe Dezember 2002]
- [14] iRFP *Referenzliste zu FBS*
<http://www.irfp.de/deutsch/fbs/referenzen.html>
[Leipzig, Stand: 17.05.2004]
- [15] RMCon *RailSys - Anwender*
<http://www.rmcon.de/anwender.html>
[Hannover, Stand: k.A.]
- [16] RMCon *RailSys – über RailSys*
http://www.rmcon.de/uber_railsys.html
[Hannover, Stand: k.A.]
- [17] IVE, UNI Hannover *NEMO - Netz Evaluations Modell*
Informationsbroschüre unter

- http://www.ive.uni-hannover.de/software/nemo/index_de.shtml
[Hannover, Stand: 15.05.2004]
- [18] IVE, UNI Hannover *Dynamis – Fahrdynamik beliebiger Zugkonfigurationen*
Informationsbroschüre unter
http://www.ive.uni-hannover.de/software/dynamis/index_de.shtml
[Hannover, Stand: 25.05.2004]
- [19] IBS GmbH *Simu VII – Simulation von Eisenbahnbetriebsabläufen*
<http://www.simu.de>
[Hannover, Stand: k.A.]
- [20] IBS GmbH Vgl. zugesandte Informationsbroschüre
Simu – Simulation von Eisenbahnbetriebsabläufen
[Hannover, Stand: k.A.]
- [21] Hürlimann Handbuch: *OpenTrack – Betriebssimulationen von Eisenbahnnetzen Version 1.3*
[Zürich]
- [22] RMCon *RailSys 3.0 Timetable and Infrastructure Managment*
User Manual, 1. Edition, Version 3.1.0
[Hannover, Sommer 2004]

7 Abbildungs-/Tabellenverzeichnis

ABBILDUNG 1: INPUT/OUTPUT – SCHEMA VON BETRIEBSSIMULATIONEN IM EISENBAHNWESEN.....	12
ABBILDUNG 2: GRAFISCHE BENUTZEROBERFLÄCHE OPENTRACKS UNTER WINDOWS XP	13
ABBILDUNG 3: ARBEITSOBERFLÄCHE UND ZUGLINIEN IN FPL 4.4	15
ABBILDUNG 4: ARBEITSOBERFLÄCHE VON RAILSYS	17
ABBILDUNG 5: NEMO - NETZBELASTUNG UND ENGPASSERMITTLUNG	19
ABBILDUNG 6: INPUT/OUTPUT – SCHEMA VON DYNAMIS.....	20
ABBILDUNG 7: STRECKENVERLAUF, ENTNOMMEN AUS <i>RAILSYS</i>	47
TABELLE 1: DIE BENUTZEROBERFLÄCHE.....	23
TABELLE 2: DATEN ZU DER GLEISTOPOLOGIE	24
TABELLE 3: DIE INFRASTRUKTUR DER LEIT- UND SICHERUNGSTECHNIK.....	25
TABELLE 4: BLOCKEINSTELLUNGEN	26
TABELLE 5: DATEN ZU DER TRIEBFAHRZEUGERSTELLUNG.....	27
TABELLE 6: DATEN ZU DER WAGENZUGERSTELLUNG	28
TABELLE 7: EINGABEDATEN ZU DER BERECHNUNG DER FAHRDYNAMIK.....	28
TABELLE 8: FORMELAUSSWAHL FÜR DIE WIDERSTANDSBERECHNUNG.....	29
TABELLE 9: FAHRPLANEINTRAGUNGEN	29
TABELLE 10: KONFLIKTE, DIE ANGEZEIGT WERDEN.....	30
TABELLE 11: DISPOSITIONSMAßNAHMEN.....	30
TABELLE 12: STÖRUNGSVARIANTEN	31
TABELLE 13: VERSPÄTUNGSVARIANTEN	31
TABELLE 14: EINSTELLUNGEN ZU DER SIMULATION.....	31
TABELLE 15: AUSWERTUNGSMÖGLICHKEITEN	33
TABELLE 16: FAHRPLANTABELLE ZUR FAHRZEITMESSUNG	49